

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Krzysztof Szuchnik

**Analiza przepięć w powłokach kabli 110 kV
w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych
i określenie zasad doboru ograniczników przepięć**

Promotor:
prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska

Poznań, 2021

SPIS TREŚCI

| | |
|--|-----------|
| STRESZCZENIE | 4 |
| 1. WPROWADZENIE..... | 8 |
| 2. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY | 15 |
| 3. PRZEGLĄD LITERATURY | 17 |
| 4. LINIE KABLOWE ZE SPECJALNYM UZIEMIENIEM ŻYŁ POWROTNYCH | 22 |
| 4.1. Kable o izolacji z polietylenu PE i XLPE | 22 |
| 4.2. Konfiguracje ułożenia linii kablowych | 27 |
| 4.3. Rozwój prądów powłokowych w liniach kablowych | 28 |
| 4.4. Sposoby uziemienia żył powrotnych..... | 32 |
| 4.4.1. Uziemienie obustronne, wielokrotne, trwałe | 33 |
| 4.4.2. Uziemienie jednostronne | 35 |
| 4.4.3. Krzyżowanie ekranów metalicznych | 39 |
| 4.5. Wytrzymałość napięciowa elementów systemu kablowego | 42 |
| 4.6. Mufy separacyjne | 43 |
| 4.7. Ograniczniki przepięć do ochrony powłok zewnętrznych kabli (SVL)..... | 44 |
| 4.7.1. Zastosowanie SVL w układach z jednostronnym uziemieniem | 45 |
| 4.7.2. Zastosowanie SVL w układach z krzyżowaniem żył powrotnych..... | 45 |
| 4.8. Przewody połączeniowe ekranów | 46 |
| 4.9. Skrzynki uziemiające / crossbondingowe | 48 |
| 4.10. Kable ECC..... | 49 |
| 4.11. Izolatory wsporcze pod głowice kablowe, kołnierze zacisków rozdzielnic w wykonaniu GIS | 50 |
| 4.12. Wzrost lokalnego potencjału ziemi | 51 |
| 5. AUTORSKA PROCEDURA DOBORU I ZASTOSOWANIA OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ (SVL) W LINIACH ZE SPECJALNYM UZIEMIENIEM ŻYŁ POWROTNYCH | 53 |
| 5.1. Ograniczniki przepięć (SVL) | 53 |
| 5.2. Ogólne właściwości ograniczników przepięć z tlenków metali | 55 |
| 5.2.1. Mikrostruktura SVL | 55 |
| 5.2.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa U-I | 55 |
| 5.2.3. Czynniki degradujące przebieg charakterystyki U-I | 58 |
| 5.2.4. Stabilność cieplna ogranicznika..... | 59 |
| 5.3. Dobór parametrów SVL | 61 |
| 5.4. Sposoby łączenia i umiejscowienie SVL | 67 |
| 6. ANALIZA PRZEPIĘĆ | 70 |
| 6.1. Koordynacja izolacji w systemach kablowych WN | 70 |
| 6.2. Analiza przepięć dorywczych | 73 |
| 6.2.1. Rozpływy zwarciove - wyznaczenie wartości prądów i napięć..... | 73 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.2.2. | Obliczenia z użyciem wzorów uproszczonych – model jednofazowy | 75 |
| 6.2.3. | Macierzowy Model Wielofazowy - CIM | 78 |
| 6.2.4. | Symulacje komputerowe | 79 |
| 6.2.5. | Wpływ składowej nieokresowej prądu zwarciovego..... | 81 |
| 6.3. | Autorska analiza optymalnego wyboru modeli elementów systemu kablowego do przeprowadzenia symulacji | 84 |
| 6.3.1. | Model kabla | 84 |
| 6.3.2. | Model ogranicznika przepięć | 92 |
| 6.3.3. | Model linii napowietrznej..... | 95 |
| 6.3.4. | Model uziemienia | 98 |
| 6.3.5. | Model przewodów połączeniowych ekranów i przewodów uziemiających | 98 |
| 6.4. | Analiza przepięć udarowych..... | 100 |
| 7. | WYNIKI OBLICZEŃ I SYMULACJI | 102 |
| 7.1. | Opis badanych układów | 102 |
| 7.2. | Zakres obliczeń i wyniki..... | 106 |
| 7.3. | Wyznaczenie maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia obniżonego U_{res} | 113 |
| 7.4. | Dobór i sprawdzenie parametrów SVL | 114 |
| 7.5. | Podsumowanie | 120 |
| 8. | WNIOSKI | 124 |
| | LITERATURA..... | 126 |
| | KATALOGI PRODUCENTÓW, SPECYFIKACJE TECHNICZNE..... | 135 |
| | ZAŁĄCZNIK A.1..... | 136 |
| | ZAŁĄCZNIK A.2..... | 144 |
| | ZAŁĄCZNIK B.1..... | 151 |
| | ZAŁĄCZNIK B.2..... | 156 |

Streszczenie

Biorąc pod uwagę zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną, linie kablowe wysokich napięć muszą sprostać wymaganiom związanym z wielkością przesyłu mocy i redukcją strat przesyłowych, to umożliwia zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych, które stanowi podstawę współczesnych rozwiązań projektowych linii kablowych. Przy zastosowaniu specjalnego uziemienia żył powrotnych w miejscach, w których ekran metaliczny nie został uziemiony, istnieje zagrożenie narażenia osłony zewnętrznej kabla i przekładek izolacyjnych muf na przepięcia, które przy otwartym końcu linii ulegają podwojeniu i mogą doprowadzić do uszkodzeń. Z tego względu, w celu ochrony od przepięć należy instalować ograniczniki przepięć tzw. SVL (ang. *Sheath Voltage Limiter*). Ograniczniki te mają za zadanie ochronę osłon kabli przed przepięciami o charakterze udarowym (przepięcia atmosferyczne/piorunowe, łączeniowe), ale nie są w stanie chronić przed przepięciami o częstotliwości sieciowej, tj. przepięciami dorywczymi.

Doświadczenia eksploatacyjne wyraźnie wskazują, że wiele z dotychczasowych metod obliczeniowych, na bazie których wyznacza się poszczególne stany pracy i parametry systemu kablowego, z zastosowaniem specjalnego uziemienia żył powrotnych, nie pozwala na prawidłowy dobór ograniczników przepięć SVL. Dochodzi do wielu awarii związanych z uszkodzeniami SVL, w niektórych przypadkach bardzo spektakularnych – wybuchów skrzynek, w których ograniczniki są zainstalowane, jako skutek narażenia na oddziaływanie przepięć dorywczych.

Aktualnie nie ma standardu, zarówno w Polsce jak i na świecie, który kompleksowo przedstawiałby wytyczne projektowania i budowy linii kablowych, jak również ich eksploatacji przy zastosowaniu specjalnego uziemienia żył powrotnych, przede wszystkim w aspekcie koordynacji izolacji. Dlatego, w celu zapewnienia bezawaryjnej i bezpiecznej pracy linii kablowych WN, istnieje konieczność opracowania dla inżynierów i projektantów jasnych i precyzyjnych wytycznych, niezbędnych do przeprowadzenia dogłębnej analizy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Przedmiotowe analizy mogą być wykonane przy pomocy technik komputerowych, a wyniki posłużą do poprawnego wyznaczania parametrów technicznych urządzeń do ochrony osłon kabli zainstalowanych w różnych układach i konfiguracjach.

We wstępie rozprawy, w oparciu o literaturę i doświadczenia autora podjęto próbę uporządkowania istniejącej wiedzy dotyczącej linii kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych, głównie w zakresie sposobu przeprowadzenia analizy przepięć (stanów przejściowych) oraz modelowania komputerowego linii kablowych wysokich napięć.

W rozdziale 2 sprecyzowano cel rozprawy, jako określenie wytycznych niezbędnych do modelowania i analizy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych w zakresie wyznaczenia, z zastosowaniem technik komputerowych, wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych. Ponadto przedstawiono zakres pracy, zagadnienia do rozwiązania w problemie badawczym, a także sformułowano tezę rozprawy.

Przegląd literatury zawiera rozdział 3, w którym dogłębnie przeanalizowano ograniczenia aktualnych metod obliczeniowych i ich potencjalny wpływ na błędne wymiarowanie ograniczników przepięć SVL. Ponadto, w rozdziale tym zweryfikowano możliwości modelowania komputerowego linii kablowych z pomocą oprogramowania typu EMTP (ang. *ElectroMagnetic Transient Program*).

W rozdziale 4 opisano niezbędne, kluczowe wg autora rozprawy pod względem modelowania cyfrowego, opisy poszczególnych elementów składających się na system kablowy, konfigurowany przy zastosowaniu wysokonapięciowych kabli jednożyłowych. Zebrane i opisane informacje stanowią wynik dogłębnej analizy literaturowej oraz wiedzy pozyskanej w ramach kilkunastoletniej praktyki zawodowej autora, jako projektanta linii dystrybucyjnych i przesyłowych wysokich napięć.

Autorski proces doboru parametrów ograniczników przepięć zawarto w rozdziale 5 rozprawy. W ramach tego procesu, jako podstawowego elementu analizy przepięć w powłokach kabli 110 kV w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych, autor opracował precyzyjne wytyczne, które są niezbędne do modelowania i analizy zjawisk występujących w systemach kablowych.

W rozdziale 6 rozprawy zawarto autorską analizę optymalnego wyboru modeli cyfrowych poszczególnych elementów systemu kablowego do przeprowadzenia symulacji oraz kompleksową procedurę wyboru konkretnego ogranicznika przepięć pracującego jako SVL w oparciu o przeprowadzone obliczenia i wyniki symulacji.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz zaprezentowanych w rozdziale 7 wykazano przydatność zaproponowanego w rozprawie procesu modelowania i symulacji systemów kablowych w celu poprawnego doboru parametrów elektrycznych ograniczników przepięć SVL oraz przedstawiono ograniczenia powszechnie wykorzystywanych analitycznych metod obliczeniowych pozwalających na wyznaczenie napięć indukowanych w powłokach kabli i ich potencjalny wpływ na błędny dobór ograniczników przepięć SVL.

W podsumowaniu rozdziału 7 wskazano propozycję wykonania dodatkowych przyszłych niezbędnych badań, w celu opracowania nowych metod analitycznych, które mogłyby być pozbawione wad i ograniczeń aktualnych metod obliczeniowych w odniesieniu do opisu matematycznego obwodu ziemnopowrotnego linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, który stanowi podstawę do wyznaczenia sumarycznej wielkości prądu uziomowego oraz wartości wzrostu lokalnego potencjału ziemi w sytuacji analizy zwarcia jednofazowego oraz dwufazowego z ziemią. Wpływa to w zasadniczym stopniu na wartość napięcia odkładającego się na zaciskach ograniczników przepięć.

Natomiast w ostatnim rozdziale rozprawy zaprezentowano wnioski z przeprowadzonych analiz i ocenę stopnia osiągnięcia zakładanego w tezie rozprawy celu badań, które pozwalają na stwierdzenie, że teza postawiona w rozdziale 2 została udowodniona.

Abstract

Taking into account increasing demand for electrical power consumption, high voltage underground cable lines need to cope with requirements for high power transfer and reduction of losses, this is achieved by special bonding method, which is now fundamental method for implementation when designing high voltage cable line. When special bonding is introduced to the design of high voltage cable system, in location where sheaths are not earthed, there is a risk of exposing outersheath of the cable and cable joints to overvoltages, which when reaching an open end of the circuit, may double the amplitude and cause cable system to fail. To overcome this, in that particular locations, there is a need to install Sheath Voltage Limiters (SVL), which are protecting parts of the cable system from fast front overvoltages (lighting and switching surges), but are not able to protect the system from slow front overvoltages videlicet induced power frequency overvoltages.

Operation experience very clearly indicates that many existing calculation methods, on basis of which one can determine operation areas as well as cable system electrical parameters with special bonding, are not accurate enough to carefully and with high degree of certainty choosing correct parameters of SVL's. There are many failures of high voltage cable systems which especially refer to SVL's wrong selection. In some cases these are extremely spectacular failures, which results into explosion of link boxes, where SVL's are installed, as a follow-up of the slow front overvoltage.

As for now there is no comprehensive standard neither international nor polish, which could in full-scale describe requirements and guidelines for designing, building and maintaining high voltage cable lines with special bonding, primarily in the aspect of voltage coordination. Thus, to assure failure-free and safe operation of high voltage cable lines, there is a necessity to develop for engineers and electrical system designers clear and precise guidelines, which are required to perform in-depth cable system analysis. These analysis may be done using special software tools, where results may be used for accurate determination of technical parameters of overvoltage protectors in cable system in various arrangements and configurations.

In the introduction part of the thesis relying on references and expertise of the author an attempt for organizing actual knowledge about overvoltage analysis of high voltage cable lines with special bonding as well as cable system computer modelling is presented.

Chapter 2 describes the goal of the thesis, as a determination of guidelines and methods which are required for cable system computer modelling and overvoltage analysis. Furthermore full scope of the thesis is described, research issues are indicated and hypothesis is formulated.

Overview of the bibliography is described in chapter 3, in which limitations of actual calculation methods is extensively analyzed and influence on wrong electrical parameters determination of SVL's pinpointed. Moreover current abilities of high voltage cable computer modelling is verified for use in Electro Magnetic Transient Program (EMTP).

Chapter 4 describes imperative, crucial according to the author's recommendations, descriptions of each main high voltage cable system part in terms of design the cable system and its computer modelling, provided that single core cables are used. Summarized information in this

chapter are the result of in-depth bibliography analysis as well as author's technical expertise gathered during his work as professional high voltage transmission and distribution lines designer.

Proposed by author process of selection of the parameters of SVL's is described in chapter 5 of the thesis. Within this process, as a fundamental part of overvoltage analysis of high voltage cable system with special bonding, precise guidelines, which are required for modeling the cable system and carry out the analysis.

Chapter 6 includes developed by author detail analysis of choosing the correct digital and mathematical model of each main component of cable system with special bonding in terms of running overvoltage simulations in EMTP as well as comprehensive process of selection correct SVL device on basis of calculations and EMTP simulation results.

On the basis of the results from calculations and EMTP simulations performed by author and described in chapter 7, suitability of proposed methods for EMTP modelling and running overvoltage simulations for proper selection of SVL's parameters are demonstrated. Furthermore limitations of current analytical formulas and methods of calculation of induced voltages in cable sheaths which lead to wrong selection of SVL's are indicated.

In the summary of chapter 7 suggestions are described for additional future research areas in the field of new analytical methods to be developed for comprehensive analysis of high voltage cable systems with special bonding, which could avoid drawbacks and limitations of actual methods especially within mathematical description of earth return path, which is fundamental for correct earth current distribution and Earth Potential Rise (EPR) calculations in case of line to earth short circuit. This substantially affect the value of the voltage across SVL's terminals.

Whereas the last chapter of the thesis comprises conclusions from the research and evaluation of the extend of assumed objectives accomplishment, which allow to affirm that hypothesis stated in chapter 2 has been proven.

1. Wprowadzenie

Operatorzy systemów przesyłowych NN i dystrybucyjnych WN na terenie krajów europejskich, w tym również na terenie Polski, jako inwestorzy rozbudowujący sieć lub modernizujący istniejące linie elektroenergetyczne na terenach zurbanizowanych, nie koncentrują się wyłącznie na aspekcie ekonomicznym realizacji inwestycji. Najbardziej kluczowe jest przeprowadzenie procesu inwestycyjnego, w którym elementy infrastrukturalne muszą uzyskać akceptację społeczną. Linie napowietrzne budzą liczne protesty głównie ze względu na odczucia estetyczne i wyolbrzymione obawy istnienia zagrożenia oddziaływania pola elektrycznego i magnetycznego. Linie kablowe są znacznie bardziej akceptowane, biorąc pod uwagę uwarunkowania środowiskowe i społeczne, stąd dynamiczny ich rozwój. W największym stopniu dotyczy on krajowej sieci kablowej 110 kV, czyli głównie linii eksploatowanych przez operatorów sieci dystrybucyjnej oraz przyłączenia generacji OZE, w tym przede wszystkim dużych farm fotowoltaicznych i farm wiatrowych, również wyprowadzenia mocy z morskich farm wiatrowych planowanych do budowy na obszarze Morza Bałtyckiego. Niemniej jednak Polskie Sieci Elektroenergetyczne, jako operator systemu przesyłowego, analizują możliwości rozbudowy sieci również biorąc pod uwagę odcinki kablowe linii 220 kV i 400 kV, głównie na terenach mocno zurbanizowanych.

Biorąc pod uwagę zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną, linie kablowe muszą sprostać wymaganiom związanym z wielkością przesyłu mocy i redukcją strat przesyłowych, to umożliwia zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych, które stanowi podstawę współczesnych rozwiązań projektowych linii kablowych. Doświadczenia eksploatacyjne wyraźnie wskazują, że wiele z dotychczasowych metod obliczeniowych, na bazie których wyznacza się poszczególne stany pracy i parametry systemu kablowego z zastosowaniem specjalnego uziemienia żył powrotnych nie pozwala na prawidłowy dobór urządzeń, przede wszystkim ograniczników przepięć SVL (ang. *Sheath Voltage Limiter*) stanowiących bardzo istotny element systemu kablowego. Dochodzi do wielu awarii związanych z uszkodzeniami SVL, w niektórych przypadkach bardzo spektakularnych – wybuchów skrzynek, w których ograniczniki są zainstalowane. Metody doboru ograniczników powinny zostać zweryfikowane pod względem zastosowania bardziej zaawansowanych obliczeń z wykorzystaniem modelowania komputerowego, które przez kilkanaście ostatnich lat dynamicznie się rozwinęło i udoskonalilo oraz może stanowić podstawę analiz związanych z wymiarowaniem urządzeń.

Umiejętne wykorzystanie technik komputerowych do analizy stanów przejściowych, zarówno podczas analiz pracy obiektów istniejących, jak również w procesie projektowania nowych linii kablowych, pozwala na bardzo precyzyjne przewidywanie wartości napięć i prądów w analizowanym układzie, które mogą być wynikiem niekontrolowanych zdarzeń, w tym przede wszystkim zwarć. Najbardziej istotnym wydaje się odpowiednie skonfigurowanie układu i wyznaczenie parametrów elektrycznych w zakresie niezbędnym i dostosowanym do danego zakresu analiz. Przez dziesięciolecia najwięcej trudności sprawiało utworzenie cyfrowego modelu linii kablowej, który stanowiłby podstawę konfigurowania badanego układu, jednak w ciągu ostatnich kilku lat nastąpił przełom i takie modele stały się dostępne, co otwiera drogę do dalszych analiz, bardziej wnikliwych i pozwalających odwzorować zjawiska w układach rzeczywistych.

W niniejszej pracy doktorskiej dogłębnie przeanalizowano ograniczenia aktualnych metod obliczeniowych i ich potencjalny wpływ na błędne wymiarowanie urządzeń stanowiących podstawę niezawodności pracy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych, tj. doboru ograniczników przepięć SVL. W pracy zaproponowano również metodologię budowy cyfrowego modelu linii kablowej w celu przeprowadzenia analiz komputerowych i wskazano nowe zasady doboru ograniczników przepięć.

PROBLEM BADAWCZY

Dotychczas w sieci dystrybucyjnej 110 kV na styku z siecią przesyłową, poziom mocy zwarciovych zazwyczaj osiągał ok 2,5 GVA, natomiast nie przekraczał 5 GVA, na te parametry projektowano konstrukcje wsporcze dla linii 110 kV [99, 100]. Obecnie w przypadku wyprowadzeń liniowych 110 kV ze stacji PSE poziom mocy zwarciovych dochodzi do 7-8 GVA, a w niektórych przypadkach nawet przekracza te wartości. W związku z czym należy liczyć się na szynach 110 kV z prądem zwarciovym o wartości 40-50 kA, co jest wielkością znaczącą nawet odnosząc się do systemów pozostałych państw europejskich charakteryzujących się znacznie bardziej rozbudowaną infrastrukturą elektroenergetyczną (dane pozyskane przez autora).

Analizując specyfikacje budowy i modernizacji stacji elektroenergetycznych operatora systemu przesyłowego – Polskich Sieci Elektroenergetycznych, zauważa się wymóg, aby linie napowietrzne 110 kV były wprowadzane do stacji elektroenergetycznych jako linie kablowe. Dotyczy to rozwiązań rozdzielni 110 kV zarówno w wykonaniu napowietrznym oraz wewnętrznym (np. typu GIS). Są to odcinki kablowe zazwyczaj nie przekraczające 1 km długości, choć w przypadku przyłączenia farm wiatrowych do systemu przesyłowego, długości linii kablowych dochodzą nawet do kilkudziesięciu kilometrów.

Wytyczne operatorów sieci, jak również pewne aspekty ekonomiczne, mają wpływ na wybór sposobu uziemienia żył powrotnych linii kablowej. Wynika to z potrzeby optymalizacji doboru przekroju żyły roboczej, ze względu na spełnienie wymogu uzyskania odpowiedniej obciążalności prądowej linii kablowej. W wyniku konieczności optymalizacji doboru kabli, a także zgodnie z wytycznymi zawartymi w dedykowanych normach czy broszurach technicznych stowarzyszenia CIGRE (fr. Conseil International des Grands Réseaux Électriques), odcinki linii kablowych o długościach nie przekraczających 1 km, realizowane są głównie jako systemy typu SPB (ang. *Single Point Bonded*), czyli z żyłami powrotnymi uziemionymi z jednej strony, dla linii o długościach przekraczających 1 km stosuje się przede wszystkim układ krzyżowania żył powrotnych tzw. system CB (ang. *Cross-Bonded*).

Uziemienie ekranów metalicznych wymagane jest dla wszystkich linii kablowych przede wszystkim ze względu na zapewnienie połączenia metalicznego z ziemią żyły powrotnej / ekranu metalicznego, pancerza kabla, a także półprzewodzących zewnętrznych warstw powłoki. Wykonane nieprawidłowo może doprowadzić w konsekwencji do poważnych awarii, jak również stworzyć zagrożenie porażeniowe. Przy przepływie prądu zmiennego w żyłach roboczych kabla jednożyłowego dochodzi do indukowania się napięć w ekranach metalicznych, które w przypadku stworzenia obwodu zamkniętego (np. poprzez obustronne uziemienie) stanowią drogę zamykania

się prądu. Prądy te powodują dodatkowe straty przesyłowe, co prowadzi w konsekwencji do ograniczenia obciążalności prądowej długotrwałej danej linii kablowej. Niemniej jednak jest to najbezpieczniejszy i technicznie prosty układ. Metody specjalnego uziemienia żył powrotnych zostały opracowane w celu ograniczenia lub wyeliminowania prądów płynących w ekranach metalicznych [1]. Podejście to jest pożądane również z ekonomicznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę koszty inwestycyjne. Redukując dodatkowe straty przesyłowe umożliwia się dobór mniejszego przekroju żyły roboczej kabla. Wg dostępnych wytycznych CIGRE [88, 168], zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych jest szczególnie uzasadnione w liniach kablowych o prądzie znamionowym większym niż 500 A, ale nie ma jednoznacznej i konkretnej granicy obciążalności czy długości linii kablowej, powyżej której należałoby zastosować specjalny system uziemienia żył powrotnych. Dodatkowy koszt przesyłowych strat energii oraz koszty inwestycyjne powinny zostać zweryfikowane pod względem kosztów niezbędnych do poniesienia podczas eksploatacji linii kablowych, tj. biorąc pod uwagę zwiększone koszty eksploatacyjne związane ze wzrostem skomplikowania i wprowadzeniem dodatkowych urządzeń podatnych na uszkodzenia (ograniczniki przepięć). Wybór konkretnego rozwiązania powinien być analizowany indywidualnie dla każdego przypadku.

Przy zastosowaniu specjalnego uziemienia żył powrotnych w miejscach, w których ekran metaliczny nie został uziemiony, istnieje zagrożenie narażenia osłony zewnętrznej kabla i przekładek izolacyjnych muf na przepięcia, które przy otwartym końcu linii ulegają podwojeniu i mogą doprowadzić do uszkodzeń. Z tego względu, w celu ochrony od przepięć należy instalować ograniczniki przepięć tzw. SVL stanowiące część składową systemu kablowego. Od początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku stosowane są do tego celu wyłącznie ograniczniki przepięć z tlenków metali. Ograniczniki te mają za zadanie ochronę osłon kabli przed przepięciami o charakterze udarowym (przepięcia atmosferyczne/piorunowe, łączeniowe), ale nie są w stanie chronić przed przepięciami o częstotliwości sieciowej, tj. przepięciami dorywczymi [85]. Przepięcia dorywcze w osłonach metalicznych kabli powstają w wyniku występowania zjawiska indukcji magnetycznej. Jeżeli w żyłce roboczej kabla płynie prąd przemienny to wytworzone wokół żyły pole magnetyczne indukuje wzdłuż koncentrycznych powłok metalowych siłę elektromotoryczną, której wartość jest proporcjonalna do wartości prądu płynącego w żyłce roboczej oraz do długości kabla, a także indukcyjności wzajemnej zależnej od wymiarów układu i przenikalności magnetycznej środowiska. Najsilniejsze oddziaływanie występuje w przypadku przepływu prądu zwarciovego, z tego względu szczególnie istotnym jest wyznaczenie wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych, indukowanych w warunkach zakłóceń. W rozprawie przedstawiono szczegółowe wyprowadzenie zależności na obliczenie wartości siły elektromotorycznej.

Aktualnie nie ma standardu, zarówno w Polsce jak i na świecie, który kompleksowo przedstawiałby wytyczne projektowania i budowy linii kablowych, jak również ich eksploatacji przy zastosowaniu specjalnego uziemienia żył powrotnych, przede wszystkim w aspekcie koordynacji izolacji. W powszechnym użyciu funkcjonują jedynie pewne wytyczne i wskazówki dla inżynierów i projektantów, na bazie których projektuje się i buduje współczesne systemy kablowe [47, 68, 85, 88, 168]. Zaznaczenia wymaga fakt, że dostępna wiedza odnosząca się do projektowania linii kablowych z zastosowaniem specjalnego uziemienia żył powrotnych oparta jest na badaniach,

obliczeniach i doświadczeniach eksploatacyjnych systemów kablowych zainstalowanych w sieciach, w których poziom prądu zwarciovego nie przekraczał 25 kA i sprowadza się do analizy kilku podstawowych modeli, bez analizy bardziej złożonych układów włączając w to linie wielotorowe oraz linie mieszane kablowo-napowietrzne. Brak jest w pełni ugruntowanej wiedzy z zakresu zjawisk występujących w systemach kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych pracujących w sieci o dużej mocy zwarcioviej – przede wszystkim w zakresie pracy ograniczników przepięć, ich doboru, koniecznych do uwzględnienia współczynników bezpieczeństwa, typów i rodzajów kabli łączących ograniczniki z wyprowadzonymi z muf separacyjnych ekranami metalicznymi, wskazaniem maksymalnych długości linii kablowych z zastosowaniem uziemienia jednostronnego, czy też wskazaniem maksymalnych długości sekcji crossbondingowych. W odniesieniu do ograniczników przepięć kluczowe jest wyznaczenie napięcia indukowanego w żył powrotnej w przypadku przepływu prądu zakłóceniovego płynącego w żył roboczej kabla, które powinno być mniejsze niż napięcie trwałej pracy ogranicznika (w układzie ziemia lokalna – ekran metaliczny).

Biorąc powyższe kwestie pod uwagę istnieje konieczność opracowania i weryfikacji metodologii wykonywania dogłębnych analiz systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych na etapie projektowania. Dotyczy to przede wszystkim poprawności wyznaczania parametrów technicznych urządzeń do ochrony osłon kabli. Metodologia powinna wykorzystywać dostępne powszechnie najnowsze techniki komputerowe, które przy odpowiedniej budowie modelu cyfrowego pozwolą na weryfikację poprawności podejścia klasycznego (wykorzystującego uproszczone formuły analityczne) do wyznaczania napięć indukowanych, a w szczególności wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych, stanowiących podstawę doboru parametrów urządzeń w tym SVL, mających kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpiecznej pracy linii kablowej.

GENEZA I UZASADNIENIE TEMATU ROZPRAWY

Obecnie notuje się znaczny wzrost awarii systemów kablowych spowodowanych w głównej mierze przez uszkodzenia ograniczników przepięć, w których zastosowano specjalny system uziemienia żył powrotnych. Awarie te mają różne źródła i w większości dotyczą doziemień w wyniku zalania lub zawilgocenia skrzynek uziemiających i skrzynek krzyżowania żył powrotnych CB (ang. *Cross-Bonding Link Box*), jednakże niektóre z nich dotyczą także uszkodzenia ograniczników przepięć w wyniku przeciążenia [26, 128, 161].

Skutkiem uszkodzenia SVL (w przypadku przewodzenia SVL – linia pracuje jak uziemiona obustronnie) może być znaczne zwiększenie strat przesyłowych, tym samym ograniczenie możliwości przesyłowych danego systemu kablowego/odcinka linii kablowej. Natomiast jeżeli dojdzie do pęknięcia warystora (stosu warystorów), tj. przy otwartym obwodzie, osłona, jak również mufa kablowa nie jest chroniona od przepięć udarowych, co naraża ją na uszkodzenie.

W praktyce eksploatacyjnej zanotowano bardzo niebezpieczne przypadki wybuchów skrzynek z ogranicznikami przepięć, które miały miejsce w systemach o prądzie zwarciovym przekraczającym poziom 25 kA. Skutki tego typu zdarzeń zaprezentowano na rysunkach 1.1 oraz 1.2.



Rys. 1.1. Skutki awarii ogranicznika przepięć SVL w układzie z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych (SPB) – (fot. Jaroslaw Parciak, onsite hv solutions)



Rys. 1.2. Skutek awarii ogranicznika przepięć SVL w układzie z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych (SPB) [26]

Część z tych zdarzeń związana była z brakiem ułożenia dodatkowego kabla ECC (ang. *Earth Continuity Conductor*) równoległe do linii kablowej w układzie SPB, co zostało przeanalizowane i opisane w [103]. Kabel ECC jest przewodem układanym w bliskim sąsiedztwie i równoległe do linii kablowej WN z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, a jego główną funkcją jest zapewnienie drogi powrotnej prądu zwarciovego, dzięki czemu ma on znaczący wpływ

na ograniczenie wartości napięć indukowanych. W przypadku pozostałych zdarzeń, które miały miejsce w liniach kablowych, w których ułożono dodatkowy kabel ECC, nie znaleziono jednoznacznej przyczyny awarii [59, 60]. Niektóre spółki dystrybucyjne wprowadziły nawet w swoich wewnętrznych standardach konieczność zastosowania skrzynek do montażu ograniczników przepięć SVL w wykonaniu przeciwybuchowym, aby nie dopuścić do stworzenia zagrożenia dla osób postronnych. W kilku publikacjach dotyczących pracy systemów kablowych wysokiego napięcia zwrócono uwagę na konieczność analizy zjawisk polegających na tzw. wzroście potencjału ziemi i jego wpływu na pracę ograniczników przepięć [10, 47, 48, 128, 140]. Konieczność wyjaśnienia m. in. tego typu zdarzeń, a także chęć zebrania pełnej, gruntownej i uporządkowanej wiedzy z zakresu stosowania specjalnego uziemienia żył powrotnych w systemach kablowych, jak również sprecyzowanie szczegółowych wymagań odnośnie doboru i eksploatacji ograniczników przepięć pracujących w systemach kablowych, było powodem powołania w 2015 roku Grupy Roboczej CIGRE WG B1.50 „Sheath Voltage Limiters and Bonding Systems (Design, Testing, Operation and Monitoring)”. Projekt podjęty przez WG B1.50 w 2015 roku został ukończony w marcu 2020 r., kiedy to opublikowano Broszurę Techniczną Nr 797 [161].

Biorąc pod uwagę coraz liczniejsze przypadki gwałtownych uszkodzeń ograniczników przepięć pracujących jako ochrona od przepięć powłok kabli w systemach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych oraz trend budowy linii kablowych na terenie naszego kraju przede wszystkim na podejściach do stacji o znacznym poziomie mocy zwarciovych, należy postawić pytanie: czy jest to rozwiązanie optymalne pod względem technicznym i dostatecznie bezpieczne aby ten trend utrzymać. Dostępne metody analityczne (podejście klasyczne), według których dotychczas obliczano poszczególne stany pracy systemów kablowych charakteryzują się znacznymi uproszczeniami w stosunku do układów rzeczywistych i mogą w niektórych przypadkach dawać wyniki zdecydowanie odmienne od tych, które wystąpią [173]. W obliczeniach stosowane są uproszczone modele linii kablowych zaproponowane przez Schelkunoff'a, przy zastosowaniu impedancji obwodów ziemnopowrotnych Carsona (dla linii napowietrznych) i Pollaczka (dla linii kablowych/podziemnych) [24, 27, 28, 97, 98]. Przyjęte modele zakładają impedancje elementów obwodu ziemnopowrotnego jako niezależne od częstotliwości, z czego wynika ograniczenie ich stosowania wyłącznie do analizy stanów ustalonych o częstotliwości sieciowej [4, 15, 97, 135]. W konsekwencji, model matematyczny zjawiska jest formułowany w odniesieniu do czasu ciągłego, co oznacza, że wartość zespolona prądu płynącego w każdym punkcie analizowanego odcinka linii kablowej jest stała i nie ma możliwości w tym przypadku wykonać analiz zjawisk przejściowych [124, 158]. Przy podejściu klasycznym metoda obliczeń różnych wielkości elektrycznych jest oparta na zespolonych impedancjach obwodów ziemnopowrotnych, mających charakter przybliżony, choć powszechnie uznaje się je za dostatecznie dokładne [193, 194].

Dokładne modele matematyczne elementów sieci wprowadzają konieczność zastosowania bardzo złożonych algorytmów przekształceń matematycznych, aby uzyskać obliczenia stanów pracy układów z nich zestawionych. Także jedynym racjonalnym podejściem wydaje się być włączenie technik komputerowych do szczegółowego zamodelowania układów i symulacji zjawisk dynamicznych w zakresie oddziaływań elektromagnetycznych, co pozwala na bardzo elastyczne rejestrowanie często niedostępnych w inny sposób, zależności. Właściwości cyfrowego modelu

określonego zjawiska w ogólnym przypadku różnią się od właściwości jego modelu ciągłego, a zasadnicza różnica jest widoczna w dziedzinie częstotliwości [158]. Zachowanie systemów dynamicznych może być śledzone poprzez analizę ich opisów matematycznych, a porównanie z modelem ciągłym możliwe jest jedynie w ograniczonym przedziale czasowym. Metody numeryczne, mające zastosowanie w modelu cyfrowym umożliwiają rozwiązanie bardziej złożonych równań modelu linii kablowej Wedepohl-Wilcox'a [17], przy zastosowaniu impedancji obwodów ziemnopowrotnych Carsona (dla linii napowietrznych) i Pollaczka (dla linii kablowych/podziemnych) [17, 182].

Na świecie dostępnych jest kilka wersji programów typu EMTP (ang. *ElectroMagnetic Transient Program*), pozwalających na analizę komputerową stanów dynamicznych systemów elektroenergetycznych. Dostępne są wersje komercyjne oprogramowania takie, jak np. EMTP-RV jak również wersja darmowa obejmująca pakiet programowy ATP-EMTP z interfejsem graficznym ATPDraw™ [152], które powszechnie wykorzystuje się do badań naukowych [4, 5, 6, 7, 8, 9, 75].

Autor rozprawy w artykule pt. „Narażenia osłon/powłok kabli 110 kV od przepięć w układach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych na wprowadzeniu do stacji o dużej mocy zwarciowej – układ SPB” [172] wykazał, że w przypadku systemów kablowych zrealizowanych w układzie SPB na wprowadzeniu do stacji elektroenergetycznej o relatywnie dużej mocy zwarciowej, podejście klasyczne obliczeń wyznaczania wartości napięć indukowanych w żyłach powrotnych, z powodu znacznych uproszczeń modelu matematycznego, prowadzi do nieprawidłowych wyników. Niezbędnym w tym przypadku jest wykonanie analizy wartości chwilowych napięć, która jest możliwa wyłącznie w oparciu o techniki modelowania komputerowego.

Dlatego, w celu zapewnienia bezawaryjnej i bezpiecznej pracy linii kablowych WN, istnieje konieczność opracowania dla inżynierów i projektantów jasnych i precyzyjnych wytycznych, niezbędnych do przeprowadzenia dogłębnej analizy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Przedmiotowe analizy mogą być wykonane przy pomocy technik komputerowych, a wyniki posłużą do poprawnego wyznaczania parametrów technicznych urządzeń do ochrony osłon kabli zainstalowanych w różnych układach i konfiguracjach.

W niniejszej pracy, w oparciu o literaturę i własne badania podjęto próbę uporządkowania istniejącej wiedzy dotyczącej linii kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych głównie w zakresie modelowania komputerowego i sposobu przeprowadzenia analizy przepięć (stanów przejściowych) występujących w badanym układzie, w celu opracowania procedury wyznaczenia wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych, stanowiących podstawę doboru SVL, mających kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpiecznej pracy linii kablowej.

2. Cel, zakres i teza pracy

Celem rozprawy jest określenie wytycznych niezbędnych do modelowania i analizy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych w zakresie wyznaczenia, z zastosowaniem technik komputerowych, wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych, stanowiących podstawę doboru urządzeń do ochrony powłok/osłon i jednocześnie przekładek izolacyjnych muf separacyjnych kabli 110 kV. Mufa separacyjna stanowi osprzęt dedykowany do systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych i pozwala na przerwanie ekranu metalicznego oraz odizolowanie go poprzez nałożenie przekładki izolacyjnej, co umożliwia wyprowadzenia ekranów metalicznych na zewnątrz mufy w celu ich odpowiedniego połączenia.

ZAKRES I TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Norma PN-EN 60099-4 nie definiuje w jednoznaczny sposób zdolności pochłaniania energii przez ograniczniki przepięć w odniesieniu do stabilności termicznej. Dostępna technologia produkcji ograniczników, a także pewne ograniczenia fizyczne i materiałowe warystorów pozwalają na określenie maksymalnej temperatury, jaką może osiągnąć ogranicznik, która mieści się w granicach 190-220°C. W celu wyznaczenia temperatury ogranicznika należy zmierzyć wartość składowej czynnej prądu, która bezpośrednio odpowiedzialna jest za straty energii w ograniczniku przepięć i wzrost temperatury warystorów.

Z powodu bardzo dużej nieliniowości charakterystyki napięciowo-prądowej U-I ogranicznika, wartość skuteczna napięcia przyłożonego do jego zacisków nie odgrywa znaczącego wpływu na warunki pracy, na jakie jest narażony. Jedynie wartość chwilowa może być brana pod uwagę w przypadku wyznaczenia energii, jaką ogranicznik może pochłonąć w celu wyznaczenia punktu stabilności termicznej. Z tego względu problemem badawczym jest opracowanie sposobu wyznaczenia wartości chwilowych (przebiegów) napięć, w celu określenia warunków pracy ograniczników (SVL), niezbędnych do ich prawidłowego doboru.

Zagadnienia do rozwiązania w problemie badawczym, będącym przedmiotem rozprawy sprowadzają się do:

- 1) określenia sposobu tworzenia i konfiguracji modelu linii kablowej, a także otoczenia sieci, do badania przebiegów wolnozmiennych (o częstotliwości sieciowej) w zakresie napięć indukowanych, w szczególności uwzględnienia w modelu cyfrowym kabla budowy żyły roboczej, ekranu metalicznego, a także warstw półprzewodzących;
- 2) opracowania procedury wyznaczenia/obliczenia energii pochłanianej przez SVL, w celu określenia parametru przepięcia przejściowego TOV (ang. *Temporary OverVoltage*), oraz uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy parametr ten może mieć zastosowanie w przypadku doboru ograniczników przepięć pracujących jako SVL;
- 3) oceny wpływu składowej nieokresowej prądu zwarciovego na przebieg napięcia indukowanego, a także na wartość parametru TOV;

- 4) opracowania wytycznych dotyczących konieczności stosowania szczegółowych analiz komputerowych i ocena kiedy podejście klasyczne będzie wystarczające w celu wyznaczenia napięć, które mogą pojawić się na zaciskach SVL;
- 5) oceny wpływu konfiguracji połączenia SVL (Y/ Δ) na poziom ochrony od przepięć przy jednoczesnym uniezależnieniu od wzrostu lokalnego potencjału ziemi;
- 6) ustalenia wymogów zastosowania kabla ECC w przypadku układu CB w odniesieniu do pracy SVL.

Na podstawie analizy literaturowej stanu zagadnienia oraz w oparciu o wyniki badań autora sformułowano następującą tezę:

W procedurze określania warunków pracy beziskiernikowych ograniczników przepięć SVL (chroniących powłoki kabli) konieczne jest uwzględnienie wartości chwilowych napięć indukowanych w metalowych ekranach kabli 110 kV oraz wpływu wartości składowej nieokresowej prądu zwarciovego. Ma to szczególne znaczenie dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa pracy systemów kablowych wysokiego napięcia z różnymi sposobami uziemienia żył powrotnych kabli i prądach zwarciovych przekraczających wartość 40 kA.

W celu udowodnienia powyższej tezy podjęto następujące działania:

- dokonano przeglądu przedmiotowej literatury, w tym informacji technicznych i eksploatacyjnych podanych przez operatorów sieci WN, a dotyczących m.in.:
 - awaryjności linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych,
 - wytycznych projektowych i doświadczeń w zakresie doboru parametrów SVL,
- na podstawie zagadnień literaturowych oraz własnych doświadczeń autora jako projektanta, dokonano analizy możliwości zastosowania różnych konfiguracji i układów połączenia ekranów metalicznych kabli w liniach kablowych WN i zbadano ich potencjalne oddziaływanie na pracę ograniczników przepięć SVL,
- dokonano analizy bezpiecznych warunków pracy beziskiernikowych ograniczników przepięć, pracujących jako SVL, pod względem ich parametrów fizycznych jak również elektrycznych,
- zaproponowano szczegółowy proces doboru parametrów SVL, jako niezbędny obszar opracowania projektu technicznego linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych,
- przeprowadzono szczegółową analizę przepięć przy wykorzystaniu symulacji komputerowych dla przykładowych referencyjnych (rzeczywistych) linii kablowych WN,
- dokonano oceny dostępnych metod obliczeniowych i zaproponowano proces realizacji prac związanych z doбором parametrów SVL w przypadku nowoprojektowanych linii kablowych.

3. Przegląd literatury

W ramach grup roboczych Komitetu Studiów B1 CIGRÉ, które jest największym na świecie międzynarodowym stowarzyszeniem zrzeszającym ekspertów zajmujących się zagadnieniami dotyczącymi wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, dokonano globalnej weryfikacji doświadczeń projektowych i eksploatacyjnych linii kablowych WN. Zebrane informacje opublikowano kilkakrotnie w ramach załączników (raportów) lub rozdziałów opracowań technicznych TB (ang. Technical Brochure) dotyczących linii kablowych wysokich napięć, w tym linii ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych [24, 47, 111, 149, 161, 168]. W ostatnim dokumencie [161], który opublikowano w marcu 2020 r., szczególną uwagę poświęcono ogranicznikom przepięć SVL stanowiących jeden z kluczowych elementów wpływających na bezpieczeństwo pracy linii kablowych. Zawiera on ankiety wypełnione przez kilkunastu operatorów sieci WN, z których można podsumować następujące informacje, dotyczące doboru parametrów ograniczników przepięć SVL oraz warunków ich eksploatacji:

- wyłącznie u jednego operatora linii najwyższych napięć dobór parametrów i kompleksowe analizy przepięciowe/koordynacji izolacji przeprowadza się wykorzystując oprogramowanie typu EMTP, jednocześnie stosuje się wymóg instalacji SVL w skrzynkach w wykonaniu przeciwwybuchowym,
- w pozostałych przypadkach, głównie dla linii dystrybucyjnych WN, stosuje się procedury uproszczone w zakresie obliczeń napięć indukowanych, a pozostałe parametry SVL przyjmuje się wg nieprecyzyjnych wytycznych wewnętrznych danego operatora sieci,
- bardziej zaawansowane analizy z zastosowaniem oprogramowania typu EMTP przeprowadza się przede wszystkim jako wynik zaleceń poawaryjnych, w przypadku dotkliwych pod względem ruchowym lub ekonomicznym zdarzeń w systemie; pierwsze tego typu analizy wykonano w 2014 r, a tylko w nielicznych przypadkach analizy z zastosowaniem oprogramowania typu EMTP wykorzystano w procesie projektowania,
- powszechnym, zwłaszcza przez dużych operatorów chińskich, jest pomijanie procesu doboru parametrów SVL przy projektowaniu ze względu na napięcia indukowane, natomiast zakłada się wymianę wszystkich ograniczników po każdorazowym przepływie prądu zwarciovego w danej linii kablowej, a parametry ograniczników dobierane są wyłącznie do ochrony przed przepięciami atmosferycznymi,
- operatorzy systemów kablowych, zwracają szczególną uwagę na zabiegi eksploatacyjne w zakresie ograniczników SVL, które oprócz częstych oględzin obejmują również pomiary prądów upływnościowych oraz badanie charakterystyk U-I, a w niektórych przypadkach wymienia się wszystkie SVL na danej linii kablowej na nowe w ramach prac eksploatacyjnych, a następnie zdemontowane SVL testowane są laboratoryjnie w celu potwierdzenia ich przydatności i stanowią zamiennik do wykorzystania na pozostałych obiektach [161].

Systemy kablowe będące aktualnie w eksploatacji charakteryzują się ogromną różnorodnością przyjętych rozwiązań technicznych, technologicznych i materiałowych. Ich konfiguracja i wytyczne projektowe, głównie w zakresie doboru parametrów SVL, przez ostatnie lata uległy wielu modyfikacjom i zmianom, stąd bezpośrednie wnioskowanie na bazie powyższych ankiet, bez

analizy poszczególnych obiektów, może być nieprecyzyjne. Niemniej jednak widoczny jest globalny brak uporządkowania i standaryzacji w przedmiocie doboru parametrów ograniczników przepięć SVL, co ma przełożenie na zwiększone zaangażowanie służb eksploatacyjnych w zakresie prac prewencyjnych w odniesieniu do pewności i poprawności pracy tych urządzeń [176]. Wiąże się to z konkretnymi kosztami utrzymania linii kablowych, jak również kosztami związanymi z ewentualnym wyłączeniem danego obiektu i niedostarczeniem energii w czasie przeprowadzania prac naprawczych. Wiele rekomendacji związanych z badaniem parametrów SVL, konieczności ich wymiany po przepływie prądu zwarciovego linią kablową, czy też prewencyjnej wymiany na nowe przy każdych oględzinach, wynika ze świadomości błędnego wymiarowania tych urządzeń na etapie projektowania, a jest to skutkiem braku precyzyjnych wytycznych w tym zakresie.

Generalną zasadą doboru ograniczników przepięć pracujących jako SVL jest określenie parametru napięcia trwałej pracy powyżej wartości największego napięcia o częstotliwości sieciowej (napięcia indukowanego), jakie może pojawić się na jego zaciskach w sytuacji awaryjnego przewodzenia prądu zwarciovego przez przedmiotową linię kablową, a następnie sprawdzenie warunku ochrony od przepięć atmosferycznych i łączeniowych. Podstawowe zależności analityczne, jak również wytyczne przeprowadzenia obliczeń i dobór parametrów SVL (do lat 90-tych wykorzystywano ograniczniki wykonane na bazie iskierników połączonych szeregowo z odgromnikami z węgla krzemu SiC), opublikowano w 1965 r [12], następnie wytyczne te, na podstawie badań i doświadczeń eksploatacyjnych, sukcesywnie uzupełniano [162] i publikowano w czasopiśmie *Electra* (wydawnictwo CIGRE) [23, 175]. Pod koniec lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku dzięki postępowi materiałowemu dostępna stała się technologia produkcji ograniczników wykonanych z tlenków metali, które praktycznie od tego czasu po rekomendacji jednego z największych w tym czasie producentów kabli NKF Kabel [104] stanowiły podstawowe rozwiązanie techniczne w systemach kablowych. W niedługim czasie po tej rekomendacji opublikowano w 1990 r. w czasopiśmie *Electra* najważniejsze wytyczne projektowe dotyczące linii kablowych z zastosowaniem specjalnego uziemienia żył powrotnych stanowiące do dziś podstawę analityczną wyznaczania wartości napięć indukowanych [68]. Równolegle w roku 1991 opublikowano broszurę techniczną CIGRE, stanowiącą dokument wprowadzający do stosowania w systemach prądu przemiennego ograniczniki przepięć wykonane z tlenków metali, jako podstawowe urządzenia do ochrony przeciwprzepięciowej. Dokument ten stanowi podstawę stworzenia współczesnych standardów międzynarodowych IEC, IEEE oraz europejskich EN (w tym polskich PN-EN) traktujących o koordynacji izolacji i ochronie od przepięć [84, 145, 146, 147].

Przez ostatnie 30 lat wielokrotnie podejmowano próby ujęcia wszystkich niezbędnych informacji dotyczących projektowania i budowy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych w jeden spójny standard dla linii kablowych wysokich napięć np. opracowania CIGRE [47, 88, 149, 161, 168], czy też opracowanie IEEE 575 [85] oraz wytyczne producentów kabli, czy też producentów ograniczników przepięć [32, 123, 138]. Niemniej jednak, pomimo swojej kompleksowości, są to pewne wytyczne ogólne (wskazówki) mające zastosowanie wyłącznie dla kilku podstawowych konfiguracji i brakuje w nich procesowego podejścia do doboru konkretnych urządzeń w specyficznych warunkach pracy oraz w miejscu instalacji, jakie występują w rzeczywistości. Polska norma [126] stanowiąca podstawę projektowania i budowy linii kablowych

niestety w ogóle pomija fakt możliwości zastosowania specjalnego uziemienia żył powrotnych. Ponadto opracowanie te zawierają błędy związane z nieprawidłowym wyprowadzeniem zależności na obliczenie wartości napięć indukowanych, co zostało opisane w [42, 93, 172]. Wszystkie te dokumenty łączy jeden fakt, że w przypadku obiektów, które wychodzą poza ramy nakreślone w ich treści wszelkie analizy pracy i obliczenia należy przeprowadzić w oparciu o techniki komputerowe, tj. w szczególności z zastosowaniem oprogramowania typu EMTP. Niestety opracowania te nie precyzują, w jaki sposób należałoby takie analizy wykonać, nie zawierają one również informacji, jak budować modele cyfrowe, w celu przeprowadzenia konkretnych symulacji niezbędnych do wyspecyfikowania parametrów urządzeń. Stąd podjęto próby opracowania ogólnych wytycznych w zakresie doboru parametrów ograniczników przepięć SVL bez konieczności budowania modelu cyfrowego systemu, w którym projektowana linia kablowa miałyby być zainstalowana [57, 58, 93, 108, 192]. Opracowania te, pomimo zwiększenia szczegółowości specyfikacji parametrów samych ograniczników SVL, w dalszym ciągu nie zawierają najbardziej istotnych informacji dotyczących sposobu obliczania i wyznaczania wartości indukowanych w ekranach metalicznych przepięć dorywczych.

Najbardziej udaną próbę kompleksowego podejścia do tematu doboru parametrów ograniczników przepięć SVL podjął w 2014 r. zespół pod kierownictwem prof. Kurta Żmudy [193, 194], przede wszystkim w zakresie opracowania metody wyznaczania wartości maksymalnych przepięć dorywczych, jako wynik analizy rozplywów prądów zwarciovych w oparciu o metody obliczeń obwodów ziemnopowrotnych. Kontynuację tych prac stanowią opracowania [39, 40, 42, 43] zawierające podstawę wytycznych dla projektantów opublikowane przez PSE [35, 131]. Niemniej jednak przedstawione w opracowaniach procedury, z powodu uproszczeń schematu zastępczego, mają, podobnie jak ma to miejsce w przypadku opracowań CIGRE, ograniczone zastosowanie wyłącznie do układów linii jednotorowych oraz linii kablowych w układzie z zastosowanym krzyżowaniem żył powrotnych CB, w których poprawność wyników obliczeń napięć indukowanych jest dyskusyjna, co wykazał autor rozprawy w artykule [173]. Dla linii kablowych z jednostronnym uziemieniem SPB, w ujęciu ogólnym zaproponowane w wytycznych PSE podejście jest prawidłowe zakładając, że oba końce linii kablowej znajdują się na tym samym potencjale (przy zastosowaniu kabla ECC). W znakomitej większości obiektów rzeczywistych w zakresie linii 110 kV jest to założenie prawidłowe, co zostało przedstawione w artykule [40]. Jednakże w przypadku wprowadzania linii kablowej dystrybucyjnej do stacji operatora systemu przesyłowego, występują sytuacje łączenia kabla ECC z uziemieniem stacji w pierwszym możliwym miejscu, lub całkowitej rezygnacji z ułożenia kabla ECC w przypadku posadowienia słupa kablowego w otoczeniu uziemienia stacji (połączenie uziemienia słupa kablowego z kratownicą uziemienia stacji na jej terenie), a linia kablowa 110 kV prowadzona jest na terenie stacji bez kabla ECC (ciągłość drogi powrotnej ewentualnego prądu zwarciovego stanowi uziemienie stacji). W tej sytuacji powyższe założenie prowadzi do nieprawidłowych wyników obliczeń, gdyż nie bierze pod uwagę impedancji własnych i impedancji wzajemnych układu uziomowego stacji. Nie bierze się również pod uwagę przesunięcia fazowego potencjału elektrycznego jako wynik oddalania się od źródła prądu wprowadzonego do rozległego systemu uziemienia. Norma [86] wskazuje bardzo lakonicznie, że zaleca się stosowanie uziemienia jednostronnego w przypadku prowadzenia linii kablowej po terenie stacji wyłącznie dla bardzo krótkich odcinków kabli, bez sprecyzowania

konkretnej długości tego odcinka. Natomiast w innych przypadkach wskazuje jako preferowane zastosowanie uziemienia obustronnego. Z tego względu, aby móc precyzyjnie określić bezpieczne rozwiązanie, możliwe jest zastosowanie wyłącznie analiz komputerowych umożliwiających rozwiązanie pełnych równań Maxwella, np. wykorzystanie do obliczeń pakietu programowego CDEGS HIFREQ [55] lub umiejętne zamodelowanie układu w EMTP [4, 62], niemniej jest to bardzo szczególny przypadek i nie stanowi elementu niniejszej pracy.

Zakres uproszczonych metod obliczeniowych obejmuje przede wszystkim projektowanie obwodów pierwotnych i dobór nastaw zabezpieczeń elektroenergetycznych. Natomiast w układach rzeczywistych zwarciom towarzyszą skomplikowane stany nieustalone o charakterze falowym, elektromagnetycznym i elektromechanicznym [91]. Dlatego odpowiednie przebiegi napięć i prądów można wyznaczyć jedynie metodami symulacji komputerowej na podstawie modeli dynamicznych systemu elektroenergetycznego.

Założenia do obliczeń przejściowych stanów elektromagnetycznych przy pomocy technik komputerowych sformułował Dommel w 1969 r. [36]. Od tego czasu środowiska techniczne i naukowe zrzeszone w stowarzyszeniu CIGRE, podejmowały próby modelowania układów elektroenergetycznych i przeprowadzały niezliczone analizy stanów przejściowych przy pomocy oprogramowania typu EMTP bazującego na tych założeniach, jednocześnie uzupełniając metody obliczeń numerycznych do silnika oprogramowania [3, 17]. Po weryfikacji otrzymanych danych z symulacji z danymi otrzymanymi przy pomocy doświadczeń eksperymentalnych i pomiarami rzeczywistymi stwierdzono, że jest to bardzo użyteczne narzędzie do analiz stanów nieustalonych systemów elektroenergetycznych [4]. Począwszy od lat 80-tych dwudziestego wieku korzystanie z oprogramowania EMTP stanowiło pewnego rodzaju standard [37], przy pomocy którego podejmowano próby analiz stanów przejściowych. Niestety nie wszystkie analizy mogły być wykonane z odpowiednią precyzją z powodu braku dokładnych modeli cyfrowych elementów sieci i ich parametrów, a dotyczyło to w szczególności linii kablowych [6]. Niemniej jednak już pierwsze symulacje przepięć w liniach kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych wykonano przy pomocy EMTP w 1988 r. [114], kiedy to wykorzystano nowy cyfrowy model kabla zależny od częstotliwości, który to model przez następne lata był doskonalony [115, 116, 117], choć niestety również charakteryzował się ograniczonym zastosowaniem. Problemem w modelowaniu kabli w oprogramowaniu typu EMTP jest fakt, że program wykorzystuje uproszczony algorytm związany z interpretacją parametrów kabli – jest to procedura CC (ang. *Cable Constants*), która wymaga od użytkownika przekształcenia parametrów rzeczywistych na takie, które zostaną przez oprogramowanie EMTP odpowiednio zrozumiane [70], i dopiero te parametry w zależności od wybranego modelu kabla umożliwiają przeprowadzenie analiz w bardzo wąskim zakresie [75], ale nie stanowią uniwersalnych rozwiązań. Dlatego istnieje potrzeba zdefiniowania w jaki sposób modelować kable, aby przeprowadzić danego typu analizy stanów przejściowych. W ostatnich latach wypracowano nowe, bardziej uniwersalne modele matematyczne kabli wysokich napięć [8, 63, 139] i część z nich zaimplementowano do komercyjnych wersji oprogramowania typu EMTP, np. EMTP-RV [102, 154]. Jednocześnie opublikowano wytyczne przeprowadzania różnego typu analiz linii kablowych [8, 11, 77, 132, 163, 164]. Niestety opracowania te dotyczą wyłącznie kwestii odpowiedzi danej linii kablowej na bardzo konkretne zadane wymuszenia prądowe/napięciowe. Nie obejmują w całości procesu modelowania otoczenia sieci

i kompleksowej analizie projektowanego obiektu jakim jest linia kablowa zainstalowana w konkretnym miejscu sieci elektroenergetycznej.

Równolegle podejmowano próby modelowania pozostałych elementów sieci elektroenergetycznej w celu wykonania konkretnych analiz stanów przejściowych, np. linii napowietrznych, transformatorów, uzemień, ograniczników przepięć, czy też całych schematów zastępczych sieci, aby umożliwić użytkownikom oprogramowania EMTP wybór rozwiązań dla konkretnych celów. Jednak mnogość i rozproszenie tych danych nie ułatwia podejścia do wykonania symulacji, których wyniki będą miarodajne. Stąd w niniejszej pracy zaproponowano możliwe najbardziej aktualne i zweryfikowane modele elementów sieci służące przeprowadzeniu analiz przepięciowych w celu doboru parametrów ograniczników przepięć SVL.

4. Linie kablowe ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych

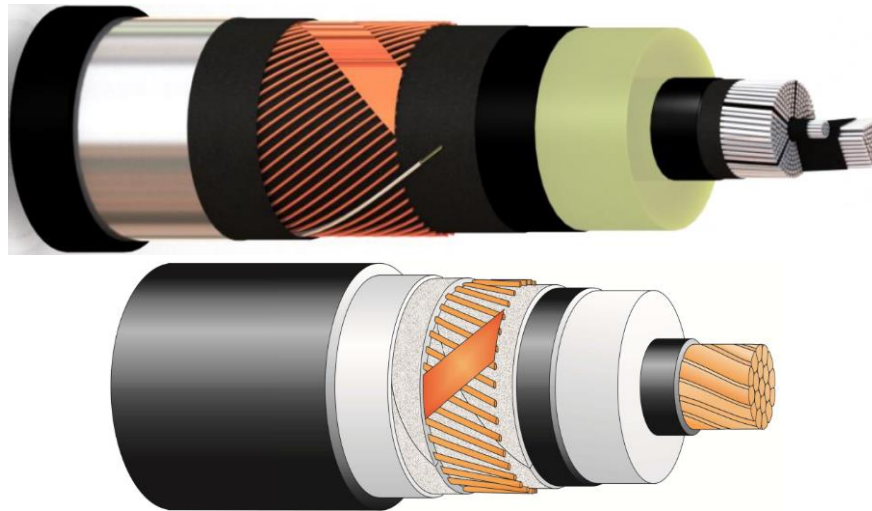
4.1. Kable o izolacji z polietylenu PE i XLPE

Modelowanie systemu kablowego do analizy stanów nieustalonych, wymaga zrozumienia funkcji, budowy i znajomości parametrów technicznych poszczególnych jego elementów. Konstrukcja samego kabla, konfiguracja w jakiej kable są ułożone, połączone w systemie elektroenergetycznym, jak również specyfika uziemienia żył powrotnych mają znaczący wpływ na występowanie stanów przejściowych. Elementy składowe systemu kablowego, jak i otoczenia sieciowego muszą być odpowiednio modelowane, aby uzyskać precyzyjne dane impedancji / admitancji i tym samym wiarygodne wyniki symulacji. Stąd też w niniejszym rozdziale w bardzo zwięzły sposób ujęto niezbędne, kluczowe wg autora pod względem modelowania, opisy poszczególnych elementów składających się na system kablowy, konfigurowany przy zastosowaniu kabli jednożyłowych. Zebrane i opisane informacje stanowią wynik bardzo dogłębnej analizy literaturowej oraz wiedzy pozyskanej w ramach kilkunastoletniej praktyki zawodowej autora jako projektanta linii dystrybucyjnych i przesyłowych wysokich napięć. W następnych częściach rozprawy podano również szczegółowe zależności niezbędne do wyprowadzenia wszystkich niezbędnych parametrów badanego układu.

Zastosowanie kabli o izolacji wytłaczanej w sieciach dystrybucyjnych zapoczątkowano w latach 60-tych XX wieku. Od tego czasu poziom wytrzymałości napięciowej izolacji wraz ze wzrostem poziomu technicznego sukcesywnie wzrastał i już w 2000 r osiągnął 500 kV. Niemniej jednak dopiero w ostatnim dwudziestoleciu nastąpił szczególny wzrost popularności kabli jednożyłowych wysokiego napięcia w izolacji wytłaczanej, głównie biorąc pod uwagę następujące kwestie:

- 1) pozytywne doświadczenia eksploatacyjne,
- 2) minimalny wpływ na środowisko naturalne,
- 3) brak skomplikowanych układów utrzymania ciśnienia medium izolacyjnego,
- 4) minimalny zakres wymaganych zabiegów/czynności eksploatacyjnych.

Na rysunku 4.1 przedstawiono przykład typowych konstrukcji kabli wysokiego napięcia, których podstawowe warstwy obejmują: żyłę roboczą, wewnętrzną warstwę półprzewodzącą (czyli ekran półprzewodzący na żyłę), izolację, zewnętrzną warstwę półprzewodzącą (czyli ekran półprzewodzący na izolacji), ekran metaliczny (żyłę powrotną) i osłonę (powłokę zewnętrzną).



Rys. 4.1. Typowe konstrukcje kabli WN 110 kV NA2XS(FL)2Y prod. Demirer Kablo [198] oraz XRUHKXS prod. TELE-FONIKA Kable [199]

Przedstawiona konfiguracja poszczególnych warstw jest praktycznie identyczna dla wszystkich kabli jednożyłowych produkowanych współcześnie, bez względu na przekrój żyły roboczej czy zastosowanie różnego rodzaju materiałów. Poniżej omówiono najbardziej istotne pod względem modelowania parametry techniczne i materiałowe poszczególnych elementów konstrukcji kabla mających zasadniczy wpływ na tworzenie modelu cyfrowego linii kablowej.

ŻYŁA ROBOCZA

W wyniku występowania efektu naskórkowości, gęstość prądu przemiennego w żyły roboczej nie jest jednorodna w całym jej przekroju. Wyższa gęstość prądu występuje na zewnętrznych warstwach przewodnika, co w rzeczywistości redukuje efektywny przekrój roboczy. Wzór na wyznaczenie współczynnika redukcyjnego efektu naskórkowości dla żyły roboczej zawiera norma IEC 60287-1-1. Niniejszą formułę zastosowano również w większości programów komputerowych typu EMTP i powszechną praktyką w przypadku modelowania kabli jest uwzględnienie wpływu naskórkowości na wyznaczenie rzeczywistego przekroju roboczego przewodnika.

Zjawisko zbliżenia powstaje pomiędzy przewodami różnych faz i powoduje zwiększenie gęstości prądu przemiennego w granicy obwodu zewnętrznego pierwszego przewodnika w miejscu zbliżenia do drugiego przewodnika. Zjawisko to również wpływa na redukcję efektywnego przekroju żyły roboczej, choć w znacznie mniejszym stopniu niż zjawisko naskórkowości. Wzór na wyznaczenie współczynnika redukcyjnego zjawiska zbliżenia dla żyły roboczej zawiera norma IEC 60287-1-1. Niestety programy typu EMTP nie mają wbudowanych algorytmów, które uwzględniałyby wpływ zjawiska zbliżenia na efektywny przekrój żyły roboczej, obszar ten jest ciągle w fazie badań, co nie pozwala na zastosowanie w przypadku konfigurowania i budowy cyfrowego modelu kabla [64].

Zjawisko naskórkowości, jak i zjawisko zbliżenia, mają relatywnie większy wpływ na parametry kabli o dużych przekrojach (powyżej 1000 mm²), stąd w celu zminimalizowania negatywnych skutków tych zjawisk stosuje się konstrukcję żyły roboczej jako segmentowej tzw. typu Milliken, gdzie poszczególne segmenty żyły oddzielone są od pozostałych taśmą półprzewodzącą lub w niektórych konstrukcjach taśmą izolacyjną. W ostatnim okresie wykorzystuje się również druty emaliowane do budowy żyły roboczej, zakładając pozytywny efekt jaki może ten zabieg przynieść na ograniczenie zjawiska naskórkowości i zjawiska zbliżenia, niemniej jednak nie ma jednoznacznego potwierdzenia eksperymentalnego w zakresie stwierdzenia skuteczności izolowania poszczególnych drutów właśnie w ten sposób.

Obliczając współczynnik naskórkowości programy typu EMTP nie uwzględniają budowy segmentowej żyły roboczej, co wpływa na przewymiarowanie wpływu efektu naskórkowości. W wyniku otrzymuje się wyższe wartości rezystancji jednostkowej przy napięciu przemiennym niż wartości rzeczywiste. Podobnie jest, gdy ocenia się konstrukcje, w których zastosowano druty emaliowane. W przypadku modelowania tego typu konstrukcji żyły roboczej w celu przeprowadzenia symulacji w oprogramowaniu typu EMTP należy parametry jednostkowej rezystancji obliczyć poza tym środowiskiem w sposób indywidualnie dobrany do analizy jaką zamierza się przeprowadzić [63, 70, 164].

WARSTWA PÓLPRZEWODZĄCA WEWNĘTRZNA

Podstawową funkcją wewnętrznej warstwy półprzewodzącej wytłaczanej na żyłę roboczą kabla jest wyrównanie natężenia pola elektrycznego na zewnętrznej powierzchni żyły roboczej / przewodnika. Ze względu na fakt, że rezystywność warstwy półprzewodzącej jest znacznie większa od rezystywności przewodnika, zakłada się brak przepływu prądu i warstwa ta może być brana pod uwagę jako część układu izolacyjnego podczas obliczeń indukcyjności kabla. W odróżnieniu do tego, w obliczeniach pojemności kabla, wewnętrzna warstwa półprzewodząca powinna być brana pod uwagę jako część żyły roboczej / przewodnika. Bierze się to stąd, że potencjał na wewnętrznej warstwie półprzewodzącej jest równy wartości potencjału na żyły roboczej.

IZOLACJA

Współczesne kable jednożyłowe wysokiego napięcia posiadają izolację z polietylenu usieciowanego (XLPE). Wartość przenikalności elektrycznej tego materiału, którą należy wziąć pod uwagę podczas budowy modelu cyfrowego kabla na etapie planowania inwestycji, zawiera się pomiędzy 2,3 a 2,5. W trakcie prac projektowych wartość tą należy zweryfikować w oparciu o dane otrzymane od producenta kabla, natomiast w przypadku analizy obiektów istniejących należałoby obliczyć w oparciu o pomierzone wartości.

EKRAN PÓLPRZEWODZĄCY NA IZOLACJI

Podstawową funkcją zewnętrznej warstwy półprzewodzącej znajdującej się pomiędzy izolacją a ekranem metalicznym jest wyrównanie natężenia pola elektrycznego na wewnętrznej powierzchni ekranu metalicznego / żyły powrotnej. Podobnie, jak w przypadku warstwy półprzewodzącej wewnętrznej, rezystancja jednostkowa warstwy półprzewodzącej zewnętrznej jest znacznie większa od rezystywności przewodnika, zakłada się brak przepływu prądu i warstwa ta może być brana pod uwagę jako część układu izolacyjnego podczas obliczeń indukcyjności. W obliczeniach pojemności kabla, wewnętrzna warstwa półprzewodząca powinna być brana pod uwagę jako część żyły powrotnej / ekranu metalicznego. Bierze się to stąd, że potencjał na zewnętrznej warstwie półprzewodzącej jest równy wartości potencjału na żyły powrotnej. Obecność ekranu półprzewodzącego na żyły roboczej i na izolacji zapewnia promieniowy rozkład pola elektrycznego w izolacji kabla.

Podczas budowy cyfrowego modelu kabla w oprogramowaniu typu EMTP, należy przyjąć rzeczywisty promień każdej z poszczególnych warstw kabla w celu precyzyjnego obliczenia indukcyjności kabla. Bardzo często nie ma możliwości zamodelowania oddzielnie warstw półprzewodzących stąd w przypadku obliczeń pojemności, gdzie warstwy te zgodnie z przyjętymi powyżej założeniami należy niejako włączyć do układu izolacyjnego istnieje konieczność korekty wartości obliczonej pojemności, w przeciwnym wypadku pojemność będzie mniejsza niż rzeczywista [70]. Wymóg przekształcenia przenikalności elektrycznej izolacji wynika z konieczności zachowania wartości rzeczywistej pojemności kabla przy zmianie wymiarów geometrycznych izolacji kabla, którą wprowadza się do programu typu EMTP. Uproszczenia modelu cyfrowego nie mają znaczącego wpływu na analizy przebiegów o częstotliwości sieciowej, ale mogą być istotne w przypadku analiz przebiegów szybkodziennych co opisano w [52].

EKRAN METALICZNY (ŻYŁA POWROTNA)

Jednożyłowe kable przesyłowe wysokiego napięcia są zwykle wyposażone w zewnętrzny koncentryczny przewód, ogólnie określany jako ekran metaliczny otaczający żyłę roboczą i izolację. Ekran metaliczny może mieć postać powłoki metalowej (spawanej lub wytłaczanej), drutów, taśm lub ich kombinacji. W skład ekranu metalicznego/żyły powrotnej mogą również wchodzić metalowe tuby z włóknami światłowodowymi w tzw. kablach hybrydowych. Ekran metaliczny może spełniać także dodatkową funkcję polegającą na zapewnieniu promieniowej bariery wodnej - w przypadku zastosowania litej powłoki metalowej. Istnieje wiele różnych typów ekranów, z których najpowszechniej stosowany w Polsce, wyspecyfikowany w standardach operatorów systemów dystrybucyjnych został zaprezentowany na rysunku 4.1. jako kombinacja drutów miedzianych z tubą światłowodową, taśmą miedzianą i taśmą aluminiową.

Pozostałe typy ekranów wykonane są jako ołowiane (stopy ołowiu), aluminiowe lub miedziane taśmy lub też karbowane (w niektórych katalogach opisane jako korugowane, z ang. *corrugated*) aluminiowe tuby. Ekran ołowiane nakładane są w procesie wytłaczania na zewnętrzną warstwę półprzewodzącą. Aluminiowe lub miedziane taśmy są spawane wzdłużnie, aby zapewnić barierę przed wnikaniem wilgoci w pozostałe warstwy kabla. W przypadku konieczności zapewnienia

dotatkowej ochrony przed wnikaniem wody wzdłuż kabla pomiędzy poszczególne warstwy ekranu metalicznego wprowadza się taśmy pęczniące blokujące penetrację wody. Ekran ołowiany posiada relatywnie dużą rezystancję jednostkową w porównaniu do pozostałych konstrukcji, jest materiałem drogim, toksycznym i posiada duży ciężar jednostkowy, niemniej jednak stosuje się go w wyjątkowych sytuacjach i głównie w miejscach o wysokiej wilgotności, gdy wymaga się wysokiej odporności na korozję.

Ekran metaliczny/żyła powrotna w postaci drutów miedzianych jest stosowany w znakomitej większości współczesnych konstrukcji kabli jednożyłowych i wykorzystywany w celu zapewnienia wymaganego przekroju drogi powrotnej prądu zwarciovego (w niektórych konstrukcjach poprawiający wytrzymałość zwarciovą ekranu zbudowanego z taśm aluminiowych lub powłoki ołowianej). Procedura modelowania ekranu metalicznego w oprogramowaniu typu EMTP nie pozwala na dokładne odzwierciedlenie jego budowy, stąd wymagane jest przekształcenie parametrów (odpowiednia zmiana rezystywności poszczególnych materiałów wchodzących w skład konstrukcji ekranu metalicznego) w taki sposób, aby zastąpić ekran przez tubę jednorodną o jednakowej rezystancji jednostkowej w stosunku do ekranu kabla rzeczywistego [70]. Bazowe wartości rezystywności materiałów wykorzystywanych w konstrukcjach kabli jednożyłowych podano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Rezystywność ekranów metalicznych wg [8]

| Materiał ekranu metalicznego | Rezystywność dla 20°C (Ωm) |
|------------------------------|----------------------------|
| Ołów, stopy ołowiu | $21,4 \times 10^{-8}$ |
| Miedź | $1,7241 \times 10^{-8}$ |
| Aluminium | $2,84 \times 10^{-8}$ |

POWŁOKA (OSŁONA ZEWNĘTRZNA)

Powłoka kabla, nazywana również osłoną zewnętrzną, standardowo wykonana jest z polietylenu PE lub polwinitu PVC. Polwinit posiada lepsze właściwości odporności ogniowej niż polietylen, jest materiałem trudno rozprzestrzeniającym ogień, natomiast polietylen jest materiałem palnym. Niemniej jednak polwinit w procesie spalania uwalnia toksyczny chlorowodór, stąd ze względów bezpieczeństwa preferowany do stosowania jest polietylen. Pomimo, że przenikalność elektryczna PVC jest dużo większa od PE, nie ma to zauważalnego efektu na wyniki analiz zjawisk przejściowych w systemach kablowych [8, 63].

Oslona zewnętrzna kabla jest niezbędna do tego, aby odizolować potencjał ekranu metalicznego od ziemi oraz zapobiec jego korozji. Na osłonę oddziałują: indukowane napięcie spowodowane przepływem prądu w żyłce roboczej kabla, przepięcia indukowane o częstotliwości sieciowej spowodowane przepływem prądu zwarciovego w żyłce roboczej kabla oraz efekty zjawisk zachodzących w żyłce powrotnej, tj. przepięcia atmosferyczne i łączeniowe.

Grubość powłoki, jak również parametry fizyczne powinny być dostosowane do wymagań stawianych danej linii kablowej, niemniej jednak minimalne wymagania określone są w normach

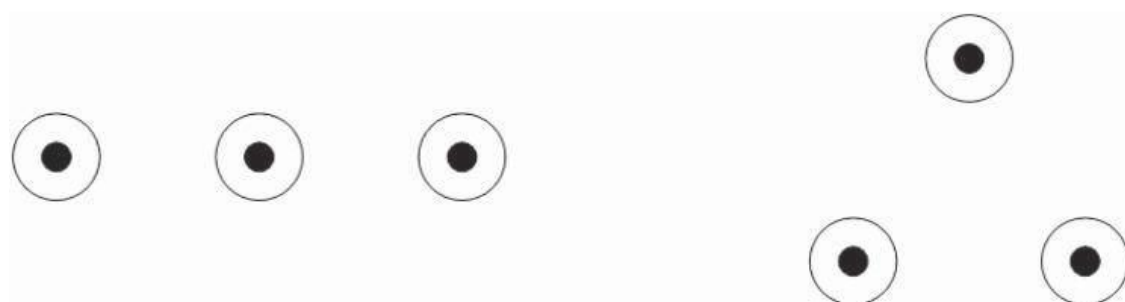
[78]. Zewnętrzna warstwa powłoki może być powlekana dodatkową warstwą półprzewodzącą zawierającą grafit lub też, alternatywnie w procesie wytłaczania w trakcie produkcji kabla, może być wykonana dodatkowa warstwa z materiału półprzewodzącego. Wykonywane jest to w celu umożliwienia przeprowadzenia pomiarów pomontażowych i eksploatacyjnych systemu kablowego w zakresie tzw. szczelności powłoki (próba napięciowa przy ustalonym napięciu), czyli sprawdzenia odporności powłoki izolacyjnej na działanie napięcia. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na konfigurację systemu uziemienia ekranów przy zastosowaniu kabli z powłoką pokrytą warstwą półprzewodzącą, aby nie doszło do pojawienia się na tej warstwie niebezpiecznego potencjału spowodowanego sprzężeniem pojemnościowym lub też spowodowanego wystąpieniem przepięć [22, 69, 118]. W przypadku instalacji systemu kablowego w tunelu kablowym przy zastosowaniu kabla z powłoką półprzewodzącą wymagane jest zastosowanie uziemienia ciągłego/wielokrotnego warstwy zewnętrznej kabla do metalowych konstrukcji na całej trasie linii kablowej, co może pod względem wykonawczym stwarzać pewne trudności.

4.2. Konfiguracje ułożenia linii kablowych

Linie kablowe w znakomitej większości przypadków ułożone są w następujący sposób:

- ułożone bezpośrednio w gruncie,
- umieszczone w rurach osłonowych lub przepustach i ułożone w gruncie,
- ułożone w kanałach kablowych,
- ułożone w tunelach kablowych.

Przy budowie linii kablowej w gruncie stosowane są dwa układy ułożenia kabli jednofazowych – układ płaski i układ trójkątny (rys. 4.2.). Wybór konkretnego rozwiązania wymaga szczegółowej analizy techniczno-ekonomicznej, biorącej pod uwagę m.in. możliwości technologiczne (montażowe), sposoby odprowadzania ciepła mające wpływ na obciążalność prądową długotrwała, a także zajętość terenu związaną z koniecznością pozyskania prawa dysponowania nieruchomością na cele budowlane dla przedsięwzięcia jakim jest linia kablowa.



Rys. 4.2. Sposoby ułożenia linii kablowych – układ płaski, układ trójkątny

Typowy odstęp pomiędzy fazami znajduje się w granicach 300 do 500 mm dla układu płaskiego (w układzie trójkątnym kable ułożone bezpośrednio w gruncie układane są na styk, inne odległości pomiędzy fazami występują przy instalacjach kabli w rurach osłonowych, przepustach).

Odnosząc się do stanów przejściowych ma to duże znaczenie jak dany układ na całej długości analizowanego odcinka linii jest zrealizowany, gdyż ma to wpływ na parametry elektryczne linii kablowej, a w szczególności jej indukcyjność. Wartość indukcyjności dla linii kablowych wzrasta, gdy odstęp pomiędzy fazami maleje. Preferowane są większe odstępki nie tylko ze względu na zmniejszenie indukcyjności, ale również ze względu na warunki oddawania ciepła do otoczenia. Także rzeczą oczywistą jest fakt, że impedancja linii kablowej zależy od sposobu jej ułożenia więc biorąc pod uwagę dokładność ewentualnych analiz i obliczeń, parametry linii kablowej należy określić dla wszystkich jej odcinków, uwzględniając różne układy ułożenia kabli na całej trasie linii.

4.3. Rozwój prądów powłokowych w liniach kablowych

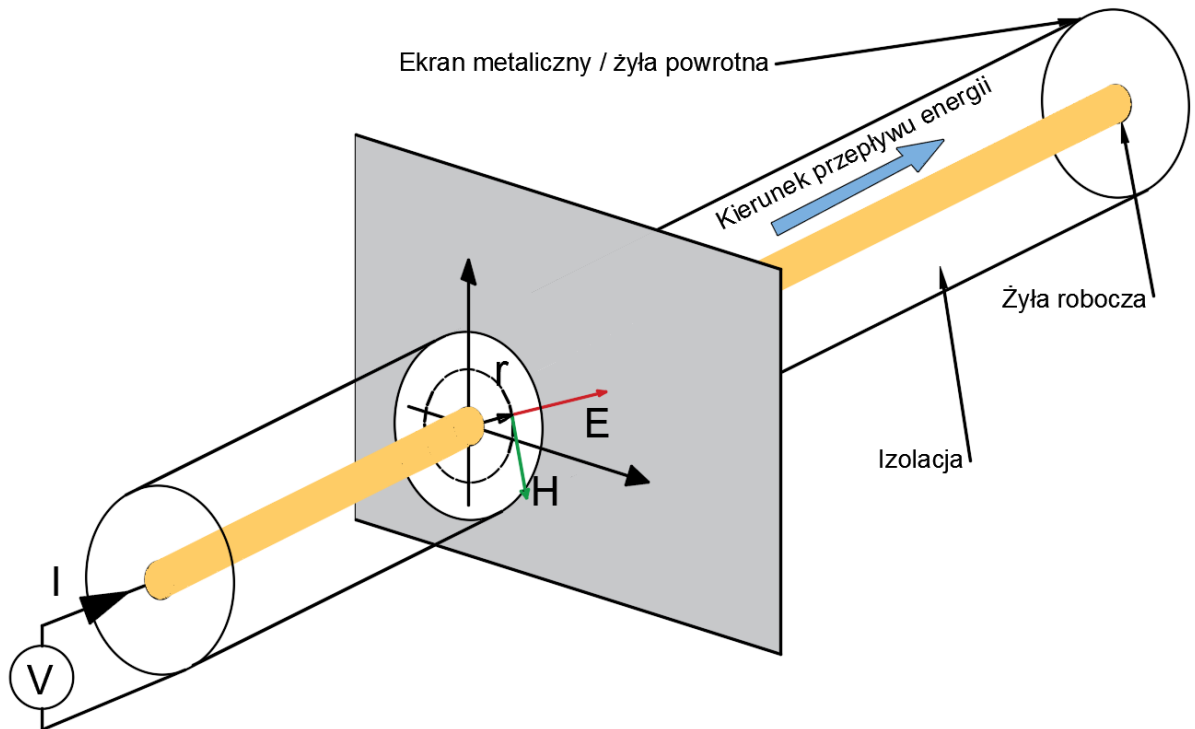
Istotą zastosowania specjalnego uziemienia żył powrotnych jest ograniczenie prądów powłokowych. Poniżej w sposób bardzo uproszczony przedstawiono fizyczne uzasadnienie przyczyn powstania tego zjawiska na podstawie [27, 28, 98].

Żyła robocza w kablu elektroenergetycznym wraz z ekranem metalicznym tworzą sprzężony magnetycznie system, którego źródłem jest przepływ prądu w żyłach roboczych kabla. Każda zmiana wartości natężenia prądu powoduje powstanie zmiennego pola magnetycznego otaczającego przewodnik, stąd wychodząc z równań Maxwella (zgodnie z prawem Ampera), każda zmiana pola magnetycznego, w którym umieszczono przewodnik stanowiący zamknięty obwód powoduje w nim przepływ prądu zgodnie z zależnością:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu I_p \quad (4.1)$$

gdzie: I_p jest całkowitym natężeniem prądu przepływającego przez powierzchnię ograniczoną przez kontur całkowania.

Schematycznie dany układ przedstawiono na rysunku 4.3. W celu uproszczenia obliczeń przyjęto budowę żyły roboczej w kształcie jednorodnego walca, a żyły powrotnej w kształcie wydrążonego walca umiejscowionego współosiowo z żyłą roboczą. Pominięto w niniejszym rozumowaniu powstawanie prądów wirowych, nie jest to istotne w związku z tematem niniejszej pracy. Przyjęto następujące oznaczenia: R – promień zewnętrzny żyły roboczej, r – odległość od osi układu (wyznacza kontur całkowania), B – indukcja magnetyczna, H – natężenie pola magnetycznego, μ – przenikalność magnetyczna ośrodka, ϵ – przenikalność elektryczna ośrodka.



Rys. 4.3. Rozwój prądów powłokowych w liniach kablowych na podstawie [24]

$$\oint B \cos \theta ds = B \oint ds = B(2\pi r) \quad (4.2)$$

$$B \cdot 2\pi r = \mu I_p \quad (4.3)$$

W poniższych wyprowadzeniach rozważono dwa przypadki, pierwszy dotyczy zależności natężenia pola magnetycznego od odległości od osi układu na zewnątrz przewodnika (żyły roboczej), natomiast drugi przypadek dotyczy zależności natężenia pola magnetycznego względem odległości od osi układu wewnątrz przewodnika (żyły roboczej kabla).

Przypadek I, dla ($r > R$)

$$I_p = I \quad (4.4)$$

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (4.5)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2\pi r} \quad (4.6)$$

Przypadek II, dla ($r < R$)

$$I_p = I \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \quad (4.7)$$

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \cdot \frac{r^2}{R^2} \quad (4.8)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \left(\frac{I}{2\pi R^2} \right) r \quad (4.9)$$

Wychodząc z zależności określonych prawem Gaussa:

$$\varepsilon \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = q \quad (4.10)$$

$$q = \varepsilon ES = \varepsilon E(2\pi RL) \quad (4.11)$$

gdzie R jest promieniem kabla, a L jego długością.

Traktując powierzchnię zewnętrzną żyły roboczej oraz powierzchnię wewnętrzną ekranu metalicznego jako okładziny kondensatora to różnica potencjałów między tymi okładzinami wyniesie:

$$U = - \int_{-}^{+} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{-}^{+} E ds \quad (4.12)$$

Stosując podstawienie:

$$dr = -ds \quad (4.13)$$

$$U = - \int_{r_1}^{r_2} E dr = - \frac{q}{\varepsilon(2\pi rL)} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{q}{\varepsilon(2\pi rL)} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{q}{\varepsilon(2\pi rL)} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (4.14)$$

Ostatecznie otrzymuje się:

$$E = \frac{U}{r \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (4.15)$$

Jeżeli natężenie prądu I płynącego w żyłce roboczej zmienia się w czasie, to zgodnie z prawem Faradaya (traktując sąsiadujące żyłki robocze kabli, czy ekrany metaliczne poszczególnych kabli jako cewki) w ekranie metalicznym zaindukuje się siła elektromotoryczna. Zjawisko to nazywa się indukcją wzajemną. W przypadku obustronnego uziemienia ekranu metalicznego kabla (zamknięty obwód przez ziemię), wymuszony zostanie przepływ prądu powłokowego. Zjawisko to ma szczególne znaczenie w przypadku przepływu prądu znamionowego w linii kablowej w odniesieniu do zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej oraz w przypadku przepływu prądów zwarciovych, w wyniku których dochodzi do indukowania się przepięć dorywczych, mających decydujące znaczenie dla prawidłowego doboru ograniczników przepięć SVL do ochrony osłon zewnętrznych kabli.

Strumień magnetyczny φ_{21} (strumień przechodzący przez pozostałe kable i ich ekrany metaliczne, związany z przepływem prądu w żyłce roboczej kabla pierwszego) sprzęga się z żyłką roboczą i ekranem metalicznym kabla drugiego.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej M'_{21} między analizowanymi przewodnikami definiuje się jako:

$$M'_{21} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} \quad (4.16)$$

Biorąc pod uwagę przepływ prądu zmiennego I_1 w przewodniku 1:

$$M'_{21} \frac{dI_1}{dt} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} \quad (4.17)$$

Ponieważ prawa strona równania, zgodnie z prawem Faradaya, równa jest wartości bezwzględnej siły elektromotorycznej SEM_2 zaindukowanej w przewodniku 2, stąd:

$$SEM_2 = -M'_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (4.18)$$

Analogicznie dla pierwszej cewki (biorąc pod uwagę przepływ prądu w przewodniku drugim):

$$SEM_1 = -M'_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (4.19)$$

W przypadku linii elektroenergetycznych w żyłce roboczej kabla płynie prąd zmienny o wartości I [A] i częstotliwości f [Hz], dlatego siłę elektromotoryczną jaką indukuje wytworzone przez przepływ prądu fazowego pole magnetyczne wzdłuż koncentrycznych powłok metalowych a także wzdłuż równoległych żył i ekranów metalicznych kabli sąsiednich, można przedstawić następująco.

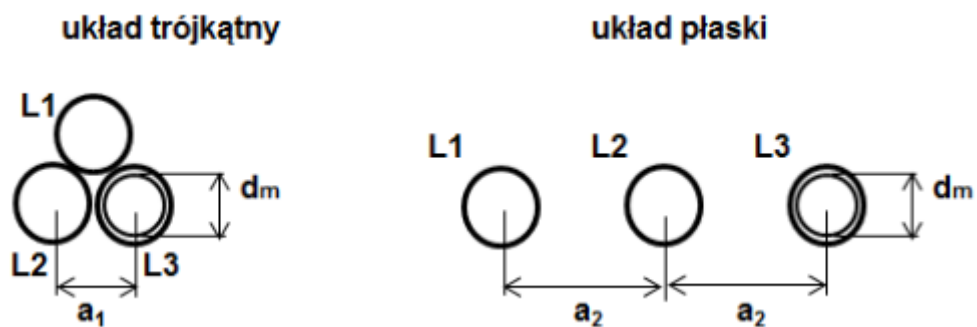
$$SEM_t = -M'I \frac{d}{dt} (\cos(2\pi ft + \varphi)) \quad (4.20)$$

Wartość maksymalna siły elektromotorycznej przyjmuje następującą zależność:

$$SEM = 2\pi fIM' \quad (4.21)$$

W elektrotechnice przyjmuje się współczynnik indukcyjności wzajemnej M' [H/m], który jest zależy tylko od geometrii układu i przekroju przewodu. W znaczeniu fizycznym wielkość indukcyjności wzajemnej M [H] liniowo zależna jest od długości przewodu, stąd ostatecznie:

$$SEM = 2\pi fILM \quad (4.22)$$



Rys. 4.4. Oznaczenia faz kabli i odległości pomiędzy nimi w układzie trójkątnym i płaskim

Wartości współczynników indukcyjności wzajemnej, biorąc pod uwagę oznaczenia zgodnie z rysunkiem 4.4, oblicza się według następujących wzorów:

- układ trójkątny:

$$M_{L1} = M_{L2} = M_{L3} = 2 \ln \left(\frac{2a}{d_m} \right) \quad (4.23)$$

- układ płaski:

$$M_{L1} = 2 \cdot \left[\left(-0.5 \cdot \ln \left(\frac{a}{d_m} \right) + j \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \ln \left(\frac{4a}{d_m} \right) \right) \right] \quad (4.24)$$

$$M_{L2} = 2 \cdot \ln \left(\frac{2a}{d_m} \right) \quad (4.25)$$

$$M_{L3} = 2 \cdot \left[\left(-0.5 \cdot \ln \left(\frac{a}{d_m} \right) - j \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \ln \left(\frac{4a}{d_m} \right) \right) \right] \quad (4.26)$$

4.4. Sposoby uziemienia żył powrotnych

Wybór sposobu uziemienia ekranów metalicznych (żył powrotnych) zależy jest od dwóch istotnych kwestii związanych z utrzymaniem poniżej wymaganego poziomu wartości napięcia, jakie może pojawić się na ekranie w różnych warunkach pracy linii oraz z ograniczeniem prądu powłokowego [141]. Biorąc pod uwagę wyłącznie pierwszy czynnik, najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest uziemienie obustronne / wielokrotne BE (ang. *Both End bonding*). Pomimo swoich zalet, zastosowanie tego układu skutkuje przepływem prądu powłokowego, którego efektem są dodatkowe straty przesyłowe i zmniejszenie dopuszczalnej obciążalności długotrwałej. Jako standard układ ten stosuje się w liniach kablowych morskich, gdzie stosowanie z powodów technologicznych innych sposobów uziemienia żył powrotnych jest utrudnione.

Z drugiej strony biorąc jedynie pod rozwagę ograniczenie strat przesyłowych i maksymalizację obciążalności prądowej linii kablowej, najbardziej preferowanym sposobem uziemienia żył powrotnych będzie uziemienie jednostronne (SPB). Przy normalnej pracy systemu prąd w ekranach metalicznych nie płynie. Jednak przy zastosowaniu metody uziemienia jednostronnego należy zwrócić szczególną uwagę na napięcia indukowane na nieuziemonym końcu linii kablowej, dodatkowo, przy zastosowaniu SPB należy równoległe do linii kablowej ułożyć dodatkowy kabel ECC, stanowiący drogę powrotną prądu zwarciovego [44, 85].

Metodą uziemienia żył powrotnych, która pozwala na „zapanowanie” nad napięciami indukowanymi w ekranach metalicznych, jak również znacznie ogranicza prądy powłokowe jest krzyżowanie żył powrotnych (CB). Metoda ta jest wykorzystywana przede wszystkim w przypadku długich linii kablowych, które można podzielić na 3 lub więcej sekcji.

Linie kablowe w wykonaniu typu „syfon” łączące linie napowietrzne wymagają bardzo zaawansowanych i szczegółowych analiz w celu doboru odpowiedniego systemu uziemienia, aby w ich wyniku skonfigurować bezpieczny i optymalny pod względem technicznym i ekonomicznym system kablowy [47].

Na terenie stacji elektroenergetycznych ekran metaliczny może zostać połączony z uziemieniem w sposób pewny i niezawodny a rezystancja uziemienia ma wartość przewidywalną niezależnie od pory roku czy wilgotności gleby [143], natomiast poza terenem stacji tak dobre warunki nie występują. W miejscu wprowadzenia linii na słup kablowy oraz w miejscach instalacji

muf, powłoki metaliczne (ekrany) narażone są na przepięcia spowodowane wyladowaniami atmosferycznymi lub napięciami indukowanymi. Podejście do projektowania (doboru i wymiarowania urządzeń) systemu kablowego w instalacjach łączących linie kablowe z liniami napowietrznymi powinno uwzględniać kwestie związane właśnie z problemem uziemienia lokalnego stanowisk słupów i muf. Wartość rezystancji uziemienia w tych miejscach jest kilkukrotnie wyższa niż na stacji oraz jest zmienna w zależności od panujących warunków atmosferycznych, ma to bezpośrednie przełożenie na poziom przepięć, na które narażone są elementy systemu kablowego takie, jak ograniczniki przepięć (SVL), osłona zewnętrzna kabla, czy też przekładki izolacyjne muf [76].

Szczególną uwagę powinno się przyłożyć do sytuacji, gdzie dwie lub więcej linii kablowych prowadzonych jest równoległe w bliskiej odległości od siebie. W odniesieniu do zastosowanego sposobu uziemienia żył powrotnych, należy mieć na uwadze występowanie wzajemnych sprzężeń pomiędzy przewodnikami obu linii, które wzajemnie jako żyły robocze i żyły powrotne jednego toru oddziałują na drugi tor. Jeżeli nie będzie to wzięte pod uwagę zbalansowany system kablowy z powodu oddziaływania drugiej linii już takim nie będzie, dotyczy to również kalkulacji strat przesyłowych i ewentualnego ułożenia dodatkowego kabla ECC. Pewne wskazówki dotyczące obliczeń wybranych przypadków znajdują się w normach [85] lub IEC 60287-1-2, natomiast nie ma norm, które podpowiedzą jak pelen proces obliczeniowy przeprowadzić w przypadku tego typu obiektów. Jedynym rozwiązaniem obecnie stanowią analizy komputerowe przy zastosowaniu oprogramowania typu EMTP.

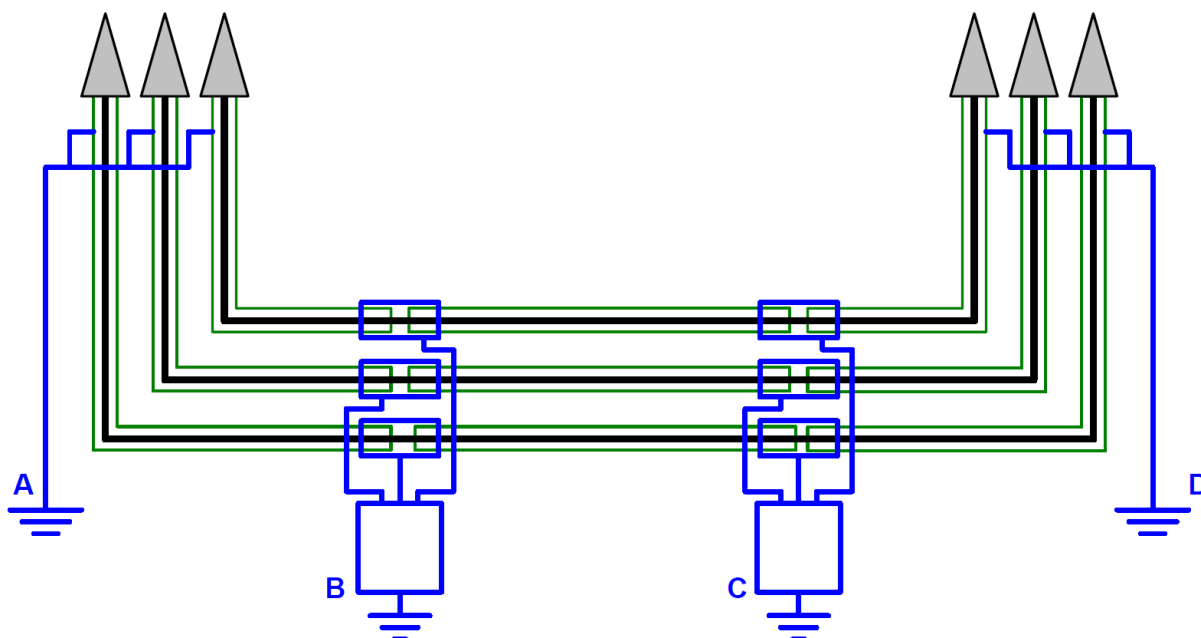
W podrozdziałach 4.4.1-4.4.3 przedstawiono szczegółowe charakterystyki różnych sposobów uziemienia żył powrotnych.

4.4.1. Uziemienie obustronne, wielokrotne, trwałe

Schemat metody uziemienia obustronnego linii kablowej przedstawiono na rysunku 4.5, w odróżnieniu od instalacji wykonywanych na świecie, gdzie tego typu schemat zastosowany jest wyłącznie dla linii morskich, w Polsce istnieje wiele linii kablowych, które w ten sposób zostały zaprojektowane i wybudowane, głównie ze względu na preferencje operatorów, które uwidocznione są zapisach indywidualnych wytycznych dla linii kablowych WN.

Uziemienie obustronne w przypadku długich linii kablowych (długość powyżej 2 km) realizowane jest jako uziemienie wielokrotne, nazywane zamiennie uziemieniem trwałym. Polega ono na uziemieniu ekranów metalicznych w miejscach łączenia odcinków prefabrykacyjnych kabli składających się na linię kablową i na poszczególnych końcach linii w miejscach zainstalowania głowic kablowych. Wynikiem tych zabiegów jest maksymalne ograniczenie wartości napięcia indukowanego w ekranie metalicznym w miejscach jego uziemienia - praktycznie do zera (napięcie szczytowe mierzone do ziemi odniesienia wynika z odłożenia się napięcia na rezystancji uziemienia danego punktu) [32]. Rezystancja uziemienia w przypadku stanowisk muf przelotowych i głowic kablowych znajdujących na słupach kablowych przyjmuje maksymalne wartości pomiędzy 5-10 Ω , natomiast na stanowiskach głowic kablowych w stacjach elektroenergetycznych wartości zazwyczaj nie przekraczają 1 Ω .

Ten typ uziemienia żył powrotnych jest typowym układem zastosowanym w liniach kablowych morskich. Ekran metaliczny kabla morskiego jest technologicznie uziemiany co 2-4 km w celu ograniczenia napięć indukowanych. Prąd powłokowy, jaki występuje w tym rozwiązaniu, może osiągać znaczne wartości, stąd wynika potrzeba odpowiedniego wymiarowania przekroju żyły powrotnej, poza warunkami zwarciovymi również ze względu na obciążalność długotrwałą, ale też w celu zminimalizowania/ograniczenia strat przesyłowych.



Rys. 4.5. Metoda obustronnego uziemienia żył powrotnych (BE) – schemat funkcjonalny, wymagane uziemienie w punktach A i D, dla uziemienia wielokrotnego – dodatkowe uziemienia w punktach B i C [161]

Uziemienie obustronne/wielokrotne wymaga zastosowania wyłącznie kabli uziemiających w miejscach połączenia z instalacją uziomową, dotyczy to muf jak i głowic kablowych, nie wymaga dodatkowych urządzeń w porównaniu z innymi metodami (brak SVL), co stanowi proste i niewymagające zabiegów eksploatacyjnych rozwiązanie, dlatego też jest ono preferowanym układem operatorów systemów elektroenergetycznych.

Niemniej jednak wadami uziemienia obustronnego jest występowanie prądów powłokowych, które w pewnych sytuacjach mogą osiągać wartości nawet 80% prądu płynącego w żyłce roboczej [18, 61, 88, 119, 161]. Skutkiem przepływu prądu powłokowego są straty ciepła, które wpływają bezpośrednio negatywnie na wartość dopuszczalnej obciążalności prądowej długotrwałej. Biorąc to pod uwagę w przypadku konieczności utrzymania wartości obciążalności prądowej wymagane jest zwiększenie przekroju żyłki roboczej kabla. Należy tu wspomnieć, że wartość prądu powłokowego nie zależy od długości linii kablowej.

Napięcie indukowane w ekranach metalicznych spowodowane przepływem prądu w żyłce roboczej kabla jest proporcjonalne do długości linii kablowej [23, 68, 85, 175]. Przyjmuje się, że w przypadku zastosowania sposobu uziemienia obustronnego / wielokrotnego potencjał ziemi występuje w każdym miejscu połączenia ekranu z uziemieniem. Ten układ stosowany jest

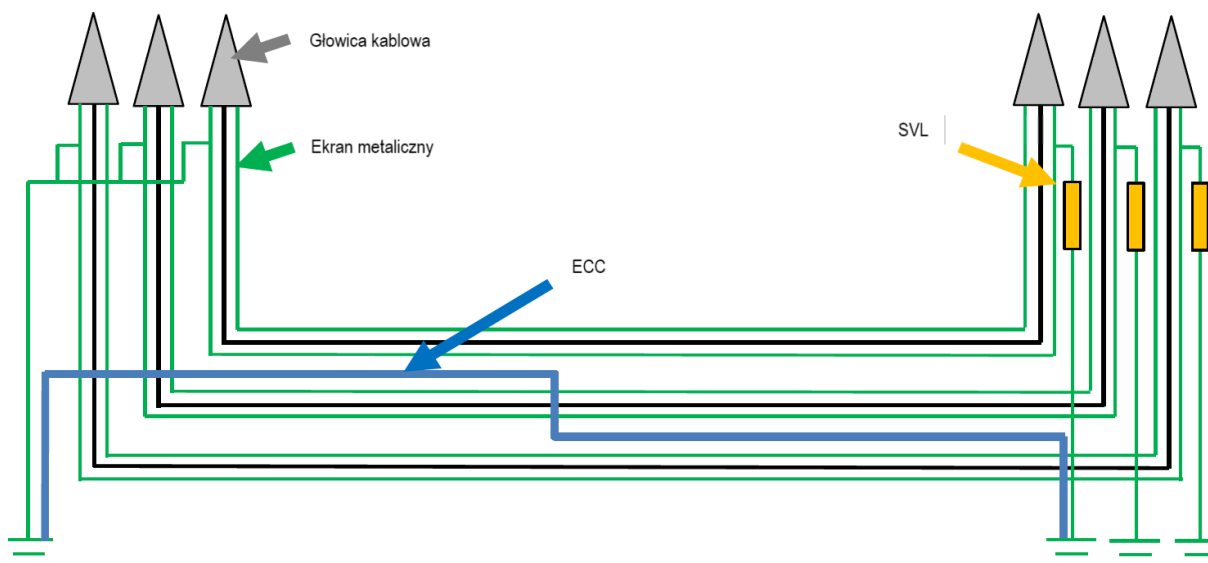
powszechnie w instalacjach średniego i niskiego napięcia. Podczas zwarcia, składowa zerowa prądu zwarciovego odprowadzana jest żyłą powrotną, następnie poprzez kable uziemiające do układu uziomowego, z tego względu należy mieć na uwadze odpowiedni dobór kabli do połączeń uziemiających.

Uziemienie stanowisk muf po trasie linii kablowej w przypadku znacznych długości linii wykonywane jest głównie ze względu na zapobieżenie ewentualnemu uszkodzeniu powłoki zewnętrznej kabla, np. w sytuacji niekontrolowanego odłączenia jednego z uziemień na końcu linii, jak również przy bardzo długich liniach w połowie ich długości, gdzie potencjał względem ziemi lokalnej osiąga znaczne wartości [32, 161, 168]. Podczas takiej sytuacji tj. pozbawienia połączenia ekranu metalicznego z uziemieniem na końcu linii, podczas normalnej eksploatacji może dojść do zaindukowania się napięcia, które może przekroczyć wartość dopuszczalną, a w sytuacji awaryjnej, podczas zwarcia mogłoby to doprowadzić do poważnej w swoich konsekwencjach awarii. Istotną kwestią w procesie projektowania jest taki dobór rozwiązań technicznych, aby możliwie precyzyjnie kontrolować wartości napięć indukowanych również w sytuacjach awaryjnych. Dobrą praktyką inżynierską jest uziemienie linii kablowych z zastosowanym obustronnym uziemieniem żył powrotnych co około od 2,5 do 4 km długości linii. Uziemienie każdego stanowiska muf pozwala na ograniczenie napięć indukowanych i ewentualnego zagrożenia do absolutnego minimum.

Przy zastosowaniu uziemienia wielokrotnego / trwałego, naturalnie stworzony ekran minimalizuje wartość natężenia pola magnetycznego wokół linii kablowej. Efekt ten jest wykorzystywany w przypadku prowadzenia linii WN w sąsiedztwie np. obwodów sterowania wrażliwych na ewentualne oddziaływanie pola magnetycznego. Przykładem takiej instalacji, gdzie stosuje się uziemienie wielokrotne w celu zmniejszenia oddziaływania na inne obwody są linie zasilające podstacje trakcyjne na terenie Polski, prowadzone równoległe do obwodów sterowania ruchem kolejowym (SRK).

4.4.2. Uziemienie jednostronne

Przykład uziemienia jednostronnego (SPB) żył powrotnych linii kablowych WN zaprezentowano na rysunku 4.6. Układ ten jest adoptowany zazwyczaj dla krótkich odcinków linii kablowych, składa się z jednej lub dwóch sekcji, polega na odizolowaniu jednego końca ekranu metalicznego danej linii kablowej i połączenie go przez ogranicznik przepięć SVL z uziemieniem. Drugi koniec ekranu jest uziemiony bezpośrednio. W układzie dwusekcyjnym uziemienie ekranów realizowane zazwyczaj w połowie długości linii kablowej, pozostałe dwa końce ekranów połączone są przez ograniczniki przepięć do uziemienia. To rozwiązanie powoduje, że obwód, którego podstawowym elementem jest ekran metaliczny kabla jest otwarty, co uniemożliwia przepływ prądu powłokowego.



Rys. 4.6. Metoda jednostronnego uziemienia żył powrotnych (SPB) – schemat funkcjonalny [161]

Wartość napięcia, które wyindukuje się na końcu linii kablowej w ekranie metalicznym przy przepływie prądu roboczego w żyłach roboczych kabla jest wartością odpowiadającą tej, która występuje również w układzie CB, tj. krzyżowania żył powrotnych. Problemem, z którym należy się zmierzyć w przypadku układu SPB są gwałtowne, krótkotrwałe zmiany napięcia. Jako środki zapobiegawcze przeciwdziałające negatywnym skutkom przepięć stosuje się kable ECC oraz ograniczniki przepięć SVL. Problemy związane z pojawieniem się zbyt dużych wartości napięć w miejscach odizolowania ekranu od potencjału ziemi lokalnej spowodowane są przede wszystkim przez:

- przepływ prądu zwarciovego jednofazowego przy zwarciach poza linią kablową (sekcją),
- przepływ prądu zwarciovego trójfazowego przy zwarciach poza linią kablową (sekcją),
- przepięcia łączeniowe,
- przepięcia atmosferyczne (zwłaszcza w przypadku linii kablowo-napowietrznych),

Przepięcia o częstotliwości sieciowej indukowane w wyniku przepływu prądu zwarciovego jednofazowego, czy też trójfazowego, można obliczyć przy pomocy równań wskazanych w opracowaniach [35, 85, 168]. Jednak w wielu sytuacjach przy obiektach złożonych obejmujących linie kablowo-napowietrzne czy też kilka linii prowadzonych równolegle w bliskiej odległości od siebie wymagane jest wykonanie bardziej zaawansowanych analiz przepięć indukowanych i oddziaływań pomiędzy poszczególnymi torami prądowymi, biorąc pod uwagę również składową nieokresową wartości napięcia indukowanego np. jako wynik przepływu prądu zwarciovego jednofazowego. Jest to niezbędne, aby zweryfikować poprawność pracy ograniczników przepięć SVL. Obliczenia tego typu możliwe są do wykonania wyłącznie w oparciu o techniki komputerowe np. przy pomocy programów typu EMTP.

W układzie uziemienia jednostronnego wyłącznie jeden koniec ekranu metalicznego jest połączony do uziemienia (stacji lub słupa). Drugi koniec jest otwarty (odizolowany od uziemienia), połączony z uziemieniem przez ogranicznik przepięć SVL. Ogranicznik przepięć SVL stanowi ochronę osłony zewnętrznej kabla przed przepięciami tzw. szybkozmiennymi tj. atmosferycznymi i łączeniowymi.

Przewód uziemiający ECC, nazywany również kablem powrotnym instalowany jest równoległe do linii kablowej w układzie SPB w jej bliskim sąsiedztwie, wyjątek stanowią linie kablowe na stacjach, w których zaciski ekranu metalicznego z jednej strony i zacisk uziemiający ogranicznika przepięć SVL połączonego do drugiego końca ekranu metalicznego przyłączone są do tego samego układu uziemiającego. W tym przypadku droga powrotna prądu zwarciego jest zapewniona i nie ma konieczności instalowania dodatkowego kabla.

W przypadku, kiedy linia kablowa ułożona jest w układzie płaskim, kabel ECC powinien zostać transponowany, co oznacza zmianę jego ułożenia w połowie linii kablowej na drugą stronę w celu ograniczenia czy też wyeliminowania prądów indukowanych w samym kablu ECC.

Uziemienie jednostronne jest uważane jako najmniej skomplikowane i najskuteczniejsze w zakresie ograniczenia strat przesyłowych spowodowanych przepływem prądów powłokowych mających wpływ na obciążalność długotrwałą linii kablowej. Może zostać wykorzystane w instalacji obejmującej połączenie dwóch stacji elektroenergetycznych, wprowadzenia linii napowietrznej jako kablowej do stacji elektroenergetycznej czy też może być wykorzystane po trasie linii kablowej z zastosowanym krzyżowaniem ekranów jako pojedyncza sekcja np. w zakresie przekroczenia przeszkody terenowej lub przy wprowadzeniu do stacji, gdzie ilość sekcji nie spełnia warunku wielokrotności 3. Uziemienie jednostronne jest niewrażliwe na ewentualny brak zbilansowania długości odcinków sekcji.

Uziemienie jednostronne może być wykorzystane przy liniach długich, należy liczyć się w tym przypadku z koniecznością sekcjonowania linii, aby utrzymać wartość indukowanego napięcia w wymaganych limitach, co spowoduje utworzenie wielu pojedynczych sekcji SPB, z których każda w jednym punkcie jest uziemiona w drugim połączona z uziemieniem przez ogranicznik przepięć SVL. Metoda ta pozwala na ograniczenie strat w linii kablowej eliminując praktycznie całkowicie przepływ prądu powłokowego, niemniej jednak wymaga zastosowania kabla powrotnego ECC, w którym na skutek zjawiska indukcji magnetycznej nastąpi przepływ prądu i w konsekwencji będzie to miało wpływ na zwiększenie strat przesyłowych układu jako całości. W porównaniu do układu krzyżowania żył powrotnych napięcia indukowane w ekranach metalicznych na skutek przepływu prądu w żyłach roboczych kabla mają wartości wyższe co ma bezpośredni wpływ na długość poszczególnych sekcji jak również wymiarowanie ograniczników przepięci do ochrony osłony zewnętrznej kabla.

W odróżnieniu od układów z zastosowanym krzyżowaniem ekranów metalicznych, uziemienie jednostronne jest niewrażliwe na różnice w długościach poszczególnych sekcji i mogą one być analizowane niezależnie do pozostałych.

Napięcia indukowane w ekranach metalicznych linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych są wprost proporcjonalne do długości danej sekcji. Dlatego

w zależności od wymagań związanych z dotrzymaniem dopuszczalnej wartości napięcia, które może trwale utrzymywać się na elementach nie stanowiących toru prądowego następuje dobór długości danej sekcji. Wartości maksymalne zależą przede wszystkim od wymagań danego operatora, gdyż nie ma obowiązujących standardów w tym zakresie, najczęściej w polskiej sieci elektroenergetycznej przyjmuje się wartość 50 V jako maksymalną. W niektórych krajach dopuszcza się poziom nawet 400 V.

W sytuacjach awaryjnych, w momencie przepływu prądu zwarciovego wartość indukowanego napięcia jest wielokrotnie większa, z powodu dużej wartości impedancji zerowej tego układu w porównaniu z pozostałymi sposobami uziemienia żył powrotnych (BE/CB) wartości przepięć dorywczych są najwyższe. Należy mieć na uwadze fakt, że powłoka zewnętrzna kabla niezależnie od warunków ułożenia samej linii kablowej – środowisko agresywne chemicznie, wysoki poziom wód gruntowych czy występowanie jakichkolwiek innych „trudnych” parametrów gruntu – musi być odpowiednio chroniona i technologicznie przygotowana do pracy przy trwałym/ciągłym występowaniu napięcia przemiennego na ekranie metalicznym kabla.

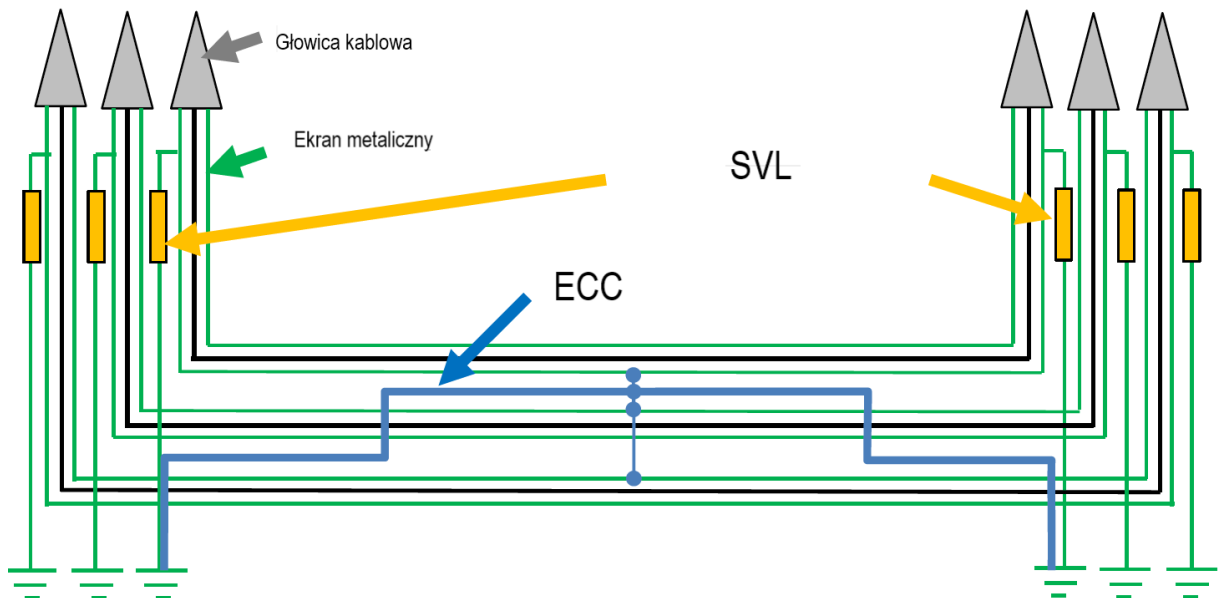
Wykorzystanie dodatkowej drogi powrotnej prądu, jak na przykład kabla ECC czy lokalnego uziemienia w przypadku linii prowadzonych na terenach stacji elektroenergetycznych, w niektórych przypadkach jest niezbędne również z powodu konieczności ograniczenia przepięć oraz ograniczenia ewentualnego oddziaływania na pozostałe obwody znajdujące się w pobliżu danej linii kablowej (np. obwody sterownia, telekomunikacyjne). Pożądane jest umieszczenie kabla ECC możliwie jak najbliżej linii kablowej, w taki sposób aby nie zmniejszyć zdolności przesyłowych całej linii kablowej (konieczna transpozycja kabla ECC). Kabel ECC powinien zostać dobrany na warunki zwarciove w miejscu instalacji, jego izolacja powinna wytrzymywać wartość wzrostu lokalnego potencjału ziemi w stosunku do ziemi odniesienia.

Generalną zasadą doboru ograniczników przepięć do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN, jest zastosowanie urządzeń o możliwie najniższej wartości napięcia znamionowego przy jednoczesnym spełnieniu wymagań braku zadziałania w przypadku wystąpienia przepięć dorywczych pochodzących od napięć indukowanych

Z praktyki zawodowej autora rozprawy wynika, że w sytuacji, kiedy możliwe jest zastosowanie jednocześnie obu sposobów uziemienia żył powrotnych, tj. krzyżowania ekranów CB i uziemienia jednostronnego SPB w danej linii kablowej i jeżeli od strony nakładów inwestycyjnych krzyżowanie ekranów jest bardziej uzasadnione ekonomicznie, rekomendowanym sposobem uziemienia żył powrotnych jest właśnie krzyżowanie ekranów. Przemawia za tym sposobem kilka kwestii: w większości przypadków nie wymagane jest ułożenie dodatkowego kabla ECC, linia ma mniejszą wartość impedancji składowej zerowej, występują mniejsze wartości napięć indukowanych jak również wzrost lokalnego potencjału ziemi jest lepiej kontrolowany.

W układzie z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych ekrany metaliczne poszczególnych faz danej linii kablowej połączone są do wspólnego uziemienia z jednej strony i odizolowane na drugim końcu linii. Punkt uziemienia znajduje się zwyczaj na jednym z końców linii kablowej, ale w przypadku, kiedy wartość napięcia indukowanego w trakcie normalnej pracy linii przewyższa dopuszczalne wartości określone w wymaganiach operatora lub nie ma możliwości zapewnienia

koordynacji izolacji i odpowiedniego doboru ograniczników przepięć do ochrony osłon zewnętrznych kabli, punkt uziemienia ekranów metalicznych może zostać zlokalizowany pośrodku długości linii kablowej, co przedstawiono na rysunku 4.7. W tym przypadku ekrany na obu końcach linii połączone są z uziemieniem przez ograniczniki przepięć. Pozwala to na ograniczenie wartości napięć indukowanych w porównaniu do standardowego układu SPB praktycznie o połowę.



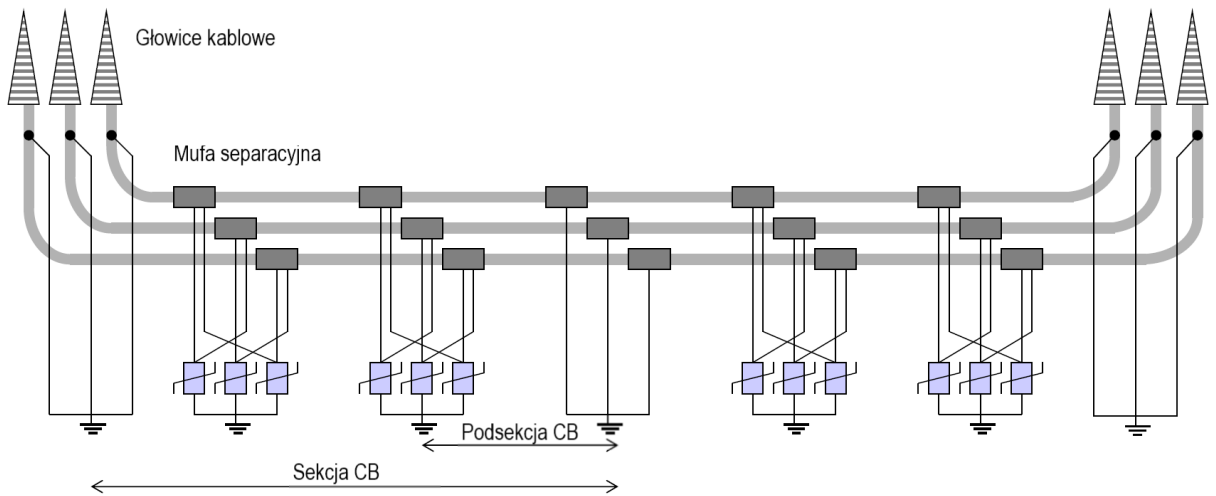
Rys. 4.7. Metoda jednostronnego uziemienia żył powrotnych (SPB) – schemat funkcjonalny uziemienia w środku długości linii kablowej [161]

Alternatywną konfiguracją do układu uziemienia jednostronnego w środku linii kablowej jest uziemienie obu końców ekranów, a połączenie ich z ogranicznikami w środku długości linii kablowej. Skutkuje to koniecznością odpowiedniej konfiguracji i doboru SVL ale znacznie poprawia warunki bezpieczeństwa na końcach linii kablowej (stacja elektroenergetyczna i/lub słup kablowy). Należy mieć jednak na uwadze konieczność weryfikacji możliwości zastosowania tego układu względem konstrukcji mufy kablowej biorąc pod uwagę wytrzymałość napięciową osłony zewnętrznej i izolacji (napięcia indukowane w obu odcinkach linii kablowej będą miały przeciwne zwroty co spowoduje zwiększenie dwukrotne wartości napięcia w miejscu przecięcia ekranów). Niezbędna w tym układzie jest weryfikacja narażenia na przepięcia atmosferyczne i łączeniowe.

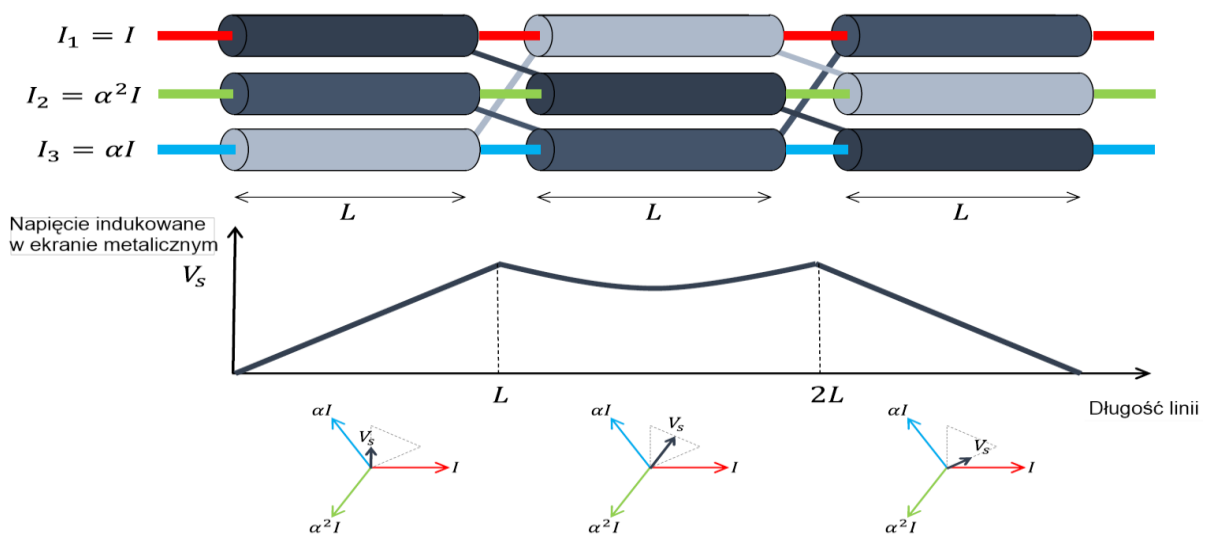
4.4.3. Krzyżowanie ekranów metalicznych

Schemat układu krzyżowania ekranów metalicznych / żył powrotnych (ang. *Cross-Bonding*, CB) zaprezentowano na rysunku 4.8. Metodę CB można zastosować w linii kablowej w przypadku, kiedy mamy do czynienia z przynajmniej 3 sekcjami, a polega ona na przerwaniu ciągłości ekranów metalicznych poszczególnych faz (kablów jednożyłowych) – podsekcje CB, i połączenia ich z ekranem drugiej fazy / kabla wg schematu przedstawionego na rysunku 4.9. W skrócie można

stwierdzić, że jeden ekran metaliczny danej sekcji linii kablowej dedykowany jest trzem fazom, każdej w 1/3 długości, a końce danej sekcji CB są uziemione.



Rys. 4.8. Metoda krzyżowania żył powrotnych (CB) – schemat funkcjonalny [161]



Rys. 4.9. Przebieg napięcia indukowanego w ekranie metalicznym w sekcji CB [161]

Taki sposób połączenia żył powrotnych ogranicza wartości napięć indukowanych jednocześnie eliminując przepływ prądów powłokowych i jest ekonomicznie najbardziej optymalnym rozwiązaniem dla linii długich [167]. Przy założeniu następujących warunków suma wektorów napięć trzech podsekcji w danej sekcji CB (rys. 4.9) wyniesie zero:

- przepływ prądu w żyłach roboczych linii kablowej;
- linia ułożona w układzie trójkątnym (obwód zbalansowany);
- jednakowa długość pod względem elektrycznym podsekcji CB (identyczne wartości impedancji wzajemnej pomiędzy poszczególnymi fazami możliwe są wyłącznie

przy zachowaniu tego samego ułożenia w każdej z podsekcji, w przypadku przepustów, przewiertów sterowanych HDD (ang. Horizontal Directional Drilling) – ułożenie w ruchach ochronnych – wartości impedancji wzajemnej pomiędzy kablami linii są różne, stąd wymagane jest przeliczenie ekwiwalentu długości elektrycznej biorąc pod uwagę różnice w odległościach pomiędzy fazami dla całej sekcji, tym samym odpowiedni podział na odcinki).

Przebieg napięcia indukowanego w ekranie metalicznym w układzie krzyżowania żył powrotnych przy założeniu spełnienia powyższych warunków pokazany jest na rysunku 4.9 (napięcia indukowane będące w przesunięciu fazowym o $1/3$ okresu na końcu sekcji są zsumowane). Nie ma fizycznej i technicznej możliwości, aby w rzeczywistej linii kablowej dotrzymać wszystkich tych warunków, co powoduje niezbilansowanie układu i odłożenie się napięcia na końcu sekcji, wynikiem jest przepływ prądu powłokowego [1, 25]. Generalnie uznaje się, że układ CB jest odpowiednio skonstruowany w przypadku, gdy prąd powłokowy w układzie CB nie przekracza 10% wartości prądu powłokowego dla tej linii przy zastosowaniu układu BE.

Zastosowanie krzyżowania żył powrotnych nie zmniejsza narażenia osłon kabli i przekładek izolacyjnych muf na przepięcia krótkotrwałe. Przepięcia atmosferyczne i łączeniowe mogą prowadzić do uszkodzeń muf separacyjnych, których specjalna budowa umożliwia wyprowadzenie ekranów metalicznych na zewnątrz kabli i ich odpowiednie połączenie w skrzynkach łączeniowych LB (ang. *Link Box*). Najwyższe napięcia na przekładkach izolacyjnych spodziewane są w przypadku uderzenia pioruna w przewód fazowy na pierwszym od strony linii kablowej przęśle linii napowietrznej w przypadku jej skablowania lub wystąpienia przeskoku odwrotnego na słupie kablowym, co wynika ze sposobu połączenia (krzyżowania) żył powrotnych oraz rozplywu prądu piorunowego, który powoduje powstanie fali przepięciowej o znacznej wartości w jednej z żył powrotnych. Ponadto fala ta jest w kablu słabo tłumiona i może wywoływać przepięcia nawet kilka kilometrów w głąb linii [168]. Wylądowanie do przewodu odgromowego w tym przypadku jest zdecydowanie mniej groźne dla przekładek izolacyjnych ze względu na większe tłumienie fali przepięciowej [168] i równomierny rozdział prądu piorunowego na żyły powrotne, dzięki czemu udar napięciowy ma niższą wartość. W obu scenariuszach zdarzeń na uszkodzenie narażona jest jednak osłona zewnętrzna kabla, ponieważ w miejscach krzyżowania żyły powrotne są odizolowane od ziemi. Stąd istnieje konieczność ochrony od przepięć, która obejmuje instalację ograniczników przepięć SVL, których połączenie przedstawiono na rysunku 4.8.

Ograniczniki przepięć w większości linii połączone są w układzie uziemionej gwiazdy w skrzynce CB. Przy dużej wartości rezystancji uziemienia skrzynki CB, napięcie jakie może odłożyć się na ograniczniku przepięć (w szczególności przepięcia dorywcze spowodowane indukowaniem się napięcia w ekranie metalicznym jako wynik przepływu prądu zwarciego w żyłę roboczej kabla) może przekroczyć wartość napięcia trwałej pracy ogranicznika i doprowadzić do jego uszkodzenia. W instalacjach, gdzie zapewnienie odpowiednich parametrów rezystancji uziemienia skrzynek CB/UZ po trasie linii może być utrudnione, możliwe jest ułożenie wzdłuż linii dodatkowego kabla ECC, do którego zaciski uziemiające skrzynek CB oraz UZ są przyłączone. Kabel ECC zmniejsza efektywnie wypadkową rezystancję uziemienia. Alternatywnym rozwiązaniem może być zmiana sposobu połączenia ograniczników przepięć z układu uziemionej gwiazdy w trójkąt [47].

Jeżeli liczba podsekcji danej linii kablowej nie jest wielokrotnością trzech, jedna lub dwie podsekcje nie stanowią układu krzyżowania żył powrotnych. Przykładowo jeżeli technicznie możliwym rozwiązaniem jest konfiguracja czterech podsekcji to jedna sekcja powinna zostać zrealizowana jako SPB (należy zwrócić szczególną uwagę w tym przypadku na sposób doboru SVL) lub BE. Niemniej jednak w rzeczywistych układach, biorąc pod uwagę np. późniejszą rozbudowę systemu, dopuszcza się realizację niepełnego układu CB złożonego z dwóch sekcji. Rozwiązanie to nie jest optymalne, ale w pewien sposób ogranicza wartości prądów powłokowych.

4.5. Wytrzymałość napięciowa elementów systemu kablowego

Wymagania dla elementów systemu kablowego WN 110 kV pod względem wytrzymałości napięciowej zaczerpnięto z następujących standardów:

- IEC 60840 – napięcie wytrzymywane udarowe, wytrzymywane napięcie stałe DC dla izolacji kabla, mufy kablowej i przewodów uziemiających,
- IEC 60229 – napięcie wytrzymywane udarowe, wytrzymywane napięcie stałe DC dla osłony zewnętrznej kabla.

Parametry wytrzymałości napięciowej dla elementów układów specjalnego uziemienia żył powrotnych tj. skrzynki CB i UZ, jak i SVL nie są zdefiniowane w standardach w odniesieniu do systemów kablowych.

W tabelach 4.1, 4.2 oraz 4.3 przyjęto nomenklaturę wg IEC 60183.

Tabela 4.1. Parametry napięciowe izolacji [78]

| Napięcie znamionowe | Maksymalne napięcie systemu | Napięcie wytrzymywane piorunowe |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| kV | kV | kV |
| 110 | 123 | 550 |

Tabela 4.2. Wytrzymałość napięciowa impulsowa osłony zewnętrznej mufy kablowej [78]

| Znamionowe napięcie wytrzymywane piorunowe izolacji głównej | Napięcie wytrzymywane piorunowe | | | |
|---|--|--|---|--|
| | Pomiędzy częściami / elementami systemu kablowego kV | | Pomiędzy częściami / elementami systemu kablowego a ziemią kV | |
| kV | Przewody uziemiające o długości poniżej 3 m | Przewody uziemiające o długości od 3 m do 10 m | Przewody uziemiające o długości poniżej 3 m | Przewody uziemiające o długości od 3 m do 10 m |
| 550 | 60 | 75 | 30 | 37,5 |

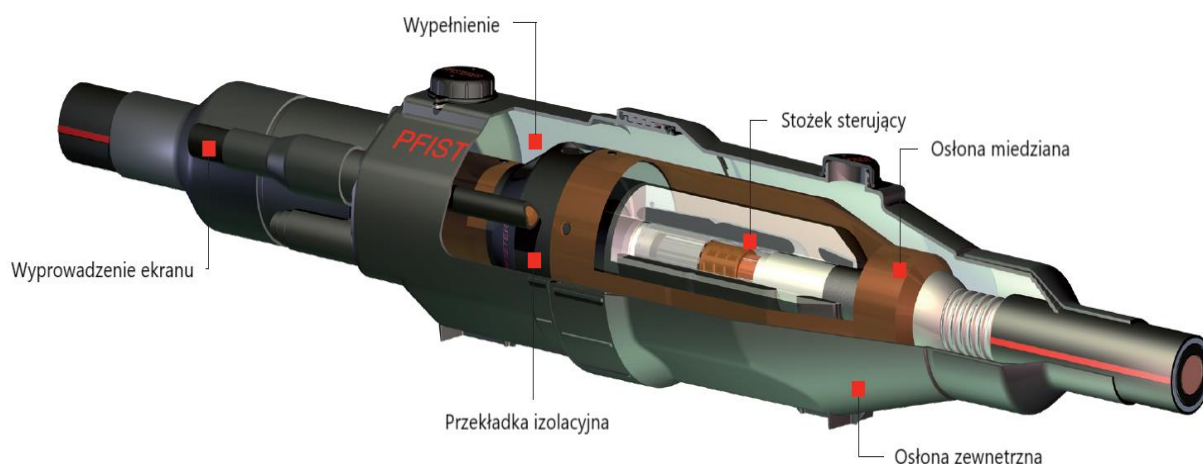
Tabela 4.3. Wytrzymałość napięciowa osłony zewnętrznej kabla wg IEC 60229

| Znamionowe napięcie wytrzymywane piorunowe izolacji głównej | Napięcie wytrzymywane piorunowe osłony zewnętrznej kabla |
|---|--|
| kV | kV |
| 550 | 37,5 |

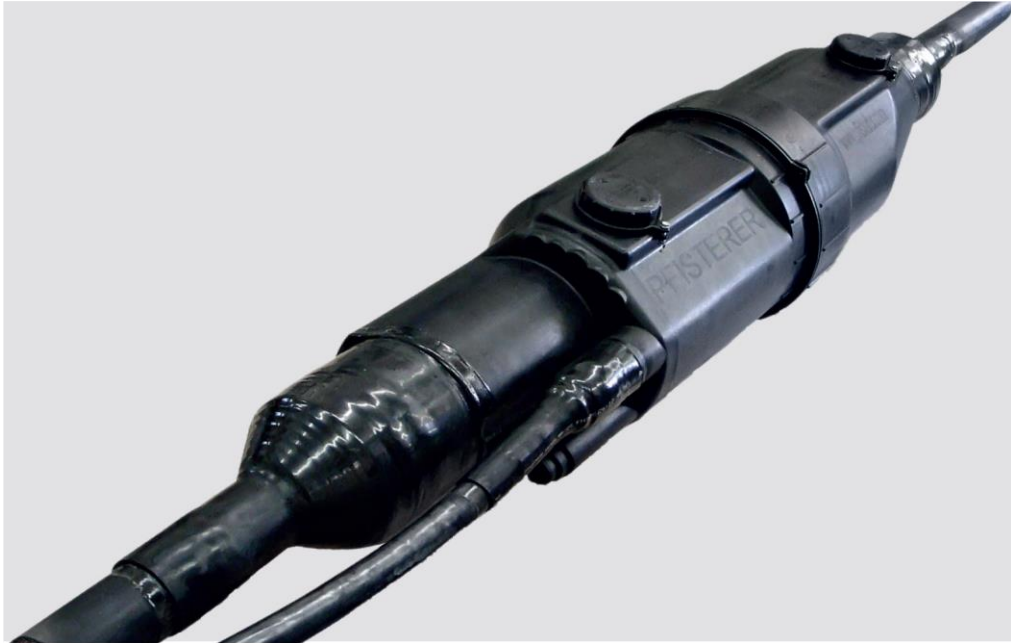
Należy mieć jednak na uwadze fakt, że parametry wytrzymałości napięciowej osłony zewnętrznej kabla po jego ułożeniu mogą nie spełniać powyższego kryterium. Ponadto efekty starzeniowe, duża wilgotność otoczenia kabla, a także inne czynniki środowiskowe wpływają dodatkowo negatywnie na wytrzymałość napięciową przez cały okres eksploatacji. Jednocześnie nie ma metod, uwzględniających te czynniki pozwalających na wyznaczenie docelowej wartości wytrzymałości napięciowej. Dlatego biorąc pod uwagę względy praktyczne to producent kabla powinien przedstawiać wartości wytrzymałości napięciowej jakie posiada kabel po ułożeniu biorąc pod uwagę cały okres eksploatacji. Na podstawie tych danych powinien być dostosowany proces doboru ograniczników przepięć pracujących jako SVL. Z doświadczenia autora (obejmującego zrealizowanie kilkunastu projektów linii kablowych 110 kV) wynika, że deklarowana przez producentów wytrzymałość napięciowa osłony zewnętrznej kabli po ich instalacji wg reżimu technologicznego gwarantującego spełnienie wymagań producenta kabla oraz przy uwzględnieniu wpływu czynników środowiskowych i starzeniowych, wynosi 60% wartości przyjmowanych dla kabli nowych, czyli ok 22,5 kV.

4.6. Mufy separacyjne

Przedstawiona na rysunku 4.10 oraz 4.11 mufa separacyjna stanowi osprzęt dedykowany do systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Pozwala ona na przerwanie ekranu metalicznego, warstw półprzewodzących i ich odizolowanie poprzez nałożenie przekładki izolacyjnej. Ekrany metaliczne są wyprowadzone na zewnątrz mufy, natomiast warstwy półprzewodzące są usunięte w taki sposób, aby utrzymać relatywnie niski poziom pola elektrycznego i nie pogarszać parametrów kabla w miejscu instalacji mufy.



Rys. 4.10. Przykład mufy separacyjnej - rysunek złozeniowy [201]



Rys. 4.11. Przykładowe zdjęcie zainstalowanej mufy separacyjnej [201]

4.7. Ograniczniki przepięć do ochrony powłok zewnętrznych kabli (SVL)

Ograniczniki przepięć do ochrony powłok zewnętrznych kabli WN – SVL (ang. *Sheath Voltage Limiter*) przeznaczone są do instalacji w systemach kablowych WN z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych [187]. Ich zadaniem jest ochrona osłon zewnętrznych kabli i przekładek izolacyjnych muf separacyjnych przed przepięciami występującymi w ekranach metalicznych kabli. Przepięcia występujące w ekranach metalicznych mogą być natury atmosferycznej, łączeniowej a także w wyjątkowych sytuacjach spowodowane udarem prądowym indukowanym w pierwszej chwili przewodzenia prądu zwarciovego przez żyłę roboczą kabla. SVL powinny być tak dobrane, aby wytrzymać bez uszkodzenia indukowane przepięcia dorywcze spowodowane prądami zwarciovymi.

Następujące trzy główne rodzaje ograniczników SVL są lub były wykorzystywane w systemach kablowych:

- beziskiernikowe ograniczniki przepięć,
- nieliniowe rezystory, jak np. ograniczniki wykonane z węgliku krzemu (SiC), połączone szeregowo z iskiernikami,
- iskierniki.

Aktualnie w znakomitej większości przypadków stosuje się beziskiernikowe ograniczniki przepięć, które spośród powyższych odznaczają się najlepszą odpowiedzią na ograniczenie przepięć szybkozmiennych, zwartą i prostą budową oraz szybkością i odpornością na odtworzenie napięcia pracy AC po zadziałaniu.

Ograniczniki przepięć SVL powinny być dobrane do warunków pracy na jakie są narażone, przede wszystkim ze względu na przepięcia dorywcze o częstotliwości sieciowej oraz możliwość

ograniczenia przepięć szybkozmiennych do poziomów wymaganych przez chronione urządzenia i elementy systemu. Ważną rzeczą jest analiza zdolności pochłaniania energii przez ogranicznik, zwłaszcza w kontekście wytrzymałości na narażenia przepięciami dorywczymi o częstotliwości sieciowej. SVL powinien ograniczać przepięcia atmosferyczne i łączeniowe, ale nie jest zdolny do ograniczenia przepięć dorywczych. W przypadku doboru ograniczników pod względem ochrony przeciwprzepięciowej nie ma jednoznacznych kryteriów związanych z utrzymaniem parametru maksymalnego napięcia obniżonego, stąd każdorazowo należy brać pod uwagę ewentualne rekomendacje operatorów sieci oraz wytyczne producentów kabli elektroenergetycznych zastosowanych w danym systemie kablowym.

Współcześnie produkowane SVL posiadają obudowę silikonową lub porcelanową i zabudowywane są w dedykowanych skrzynkach CB / UZ lub LB (ang. *Link Box*). Skrzynki skonstruowane są w taki sposób, aby umożliwić dostęp do ograniczników w przypadku zabiegów eksploatacyjnych czy pomiarowych, ale powinny być odporne na warunki w jakich są instalowane (np. zakopane w gruncie).

4.7.1. Zastosowanie SVL w układach z jednostronnym uziemieniem

Ograniczniki połączone są pomiędzy nieuziemionym końcem ekranu metalicznego poszczególnych żył kabli a uziemieniem. Przyjmuje się, że instalacja ograniczników dotyczy tego miejsca, które jest najbardziej narażone na przepięcia (atmosferyczne/łączeniowe), tj. np. w sytuacji wprowadzenia linii napowietrznej jako kablowej do stacji elektroenergetycznej, preferowanym miejscem instalacji jest słup kablowy. Niemniej jednak należy również zwrócić uwagę na możliwość i konieczność dotrzymania odpowiedniej wartości rezystancji uziemienia, w przeciwnym wypadku należy brać pod uwagę instalację SVL w miejscu, gdzie ta rezystancja jest możliwie najmniejsza. Także w niektórych sytuacjach preferowanym rozwiązaniem byłaby instalacja SVL na terenie stacji elektroenergetycznej, po pierwsze ze względu na relatywnie małą wartość uziemienia, a po drugie w celu zminimalizowania narażenia osób postronnych z powodu występującego ryzyka wybuchu skrzynki z ogranicznikami przepięć [161].

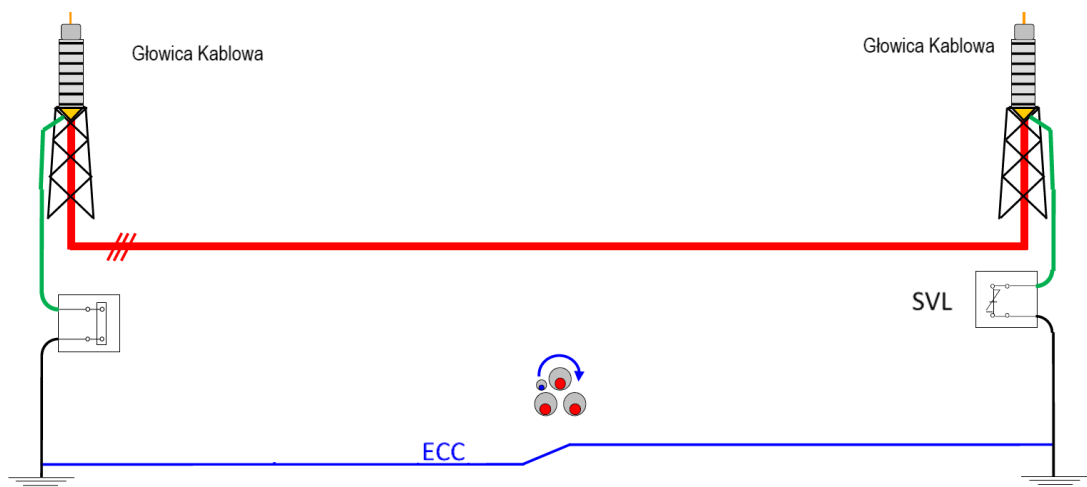
4.7.2. Zastosowanie SVL w układach z krzyżowaniem żył powrotnych

Linie kablowe z zastosowanym krzyżowaniem żył powrotnych zazwyczaj ułożone są w gruncie. Skrzynki CB oraz UZ powinny być w pewien sposób dostępne dla obsługi w celu wykonywania pomiarów okresowych czy wymiany uszkodzonych elementów systemu (np. ograniczników), z drugiej strony należy zapewnić, że elementy te nie będą dostępne dla osób postronnych. Realizuje się to na dwa sposoby, pierwszy polega na umieszczeniu skrzynek w sąsiedztwie linii kablowej bezpośrednio w gruncie. Wszystkie zabiegi eksploatacyjne wymagają dodatkowych prac ziemnych, ale elementy systemu kablowego powinny być umieszczone w sposób bezpieczny pod względem dostępu osób postronnych. Drugi sposób polega na wyniesieniu skrzynek CB tuż pod powierzchnię gruntu – umieszczenie w studniach kablowych (lub szafkach kablowych wyniesionych ponad grunt), jest to rozwiązanie preferowane przez służby eksploatacyjne, ale nie zawsze pozwala na zabezpieczenie przed dostępem osób postronnych.

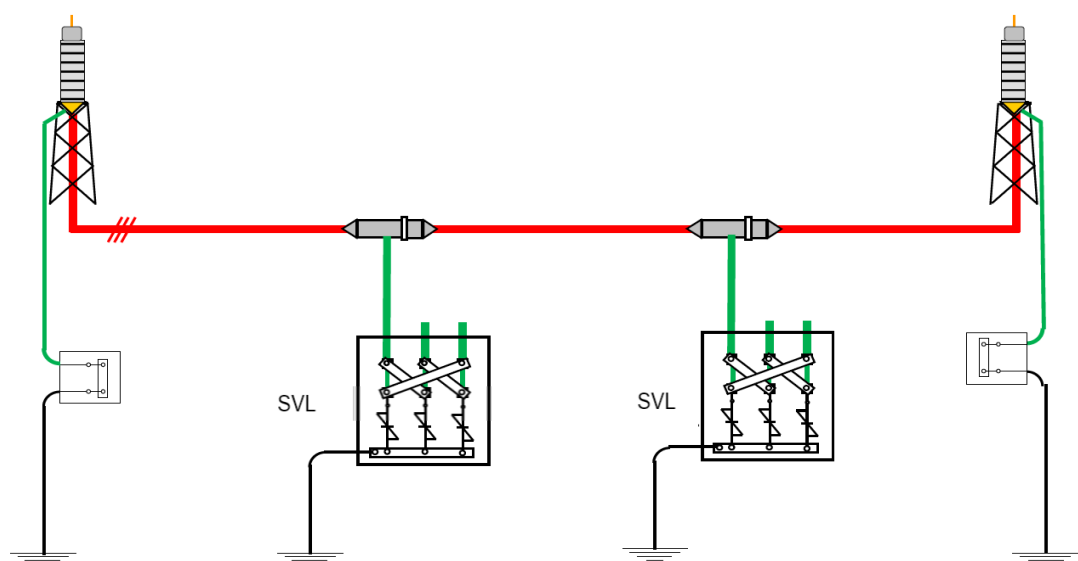
Należy mieć na uwadze, że przewody łączące wyprowadzone z mufy ekrany metaliczne z ogranicznikami przepięć w celu utrzymania odpowiedniego poziomu ochrony nie powinny być dłuższe niż 10 m (przewód stanowi dodatkowy element impedancyjny powodujący odłożenie się na nim napięcia zmniejszając jednocześnie skuteczność w ograniczeniu przepięć przez ograniczniki) [85].

4.8. Przewody połączeniowe ekranów

Przewody połączeniowe ekranów łączą ekran metaliczny kabla z zaciskiem ogranicznika przepięć zainstalowanego w skrzynce LB. Schematycznie dla układów SPB oraz CB zaprezentowano je na rysunkach 4.12 i 4.13.



Rys. 4.12. Sposób prowadzenia i łączenia przewodów połączeniowych ekranów, układ SPB – oznaczone na zielono [161]



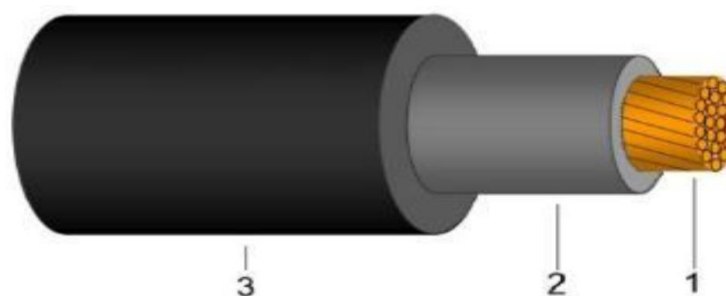
Rys. 4.13. Sposób prowadzenia i łączenia przewodów połączeniowych ekranów, układ CB – oznaczone na zielono [161]

Połączenie pomiędzy SVL a metalicznym ekranem kabla wymaga odpowiedniej koordynacji izolacji wszystkich elementów tworzących obwód odprowadzenia przepięć do ziemi, tj. skoordynowania wytrzymałości napięciowej izolacji kabli połączeniowych oraz ich długości, ekranów metalicznych i parametrów osłony zewnętrznej kabla, a także izolatorów wsporczych zainstalowanych w skrzynce oraz parametrów samego ogranicznika przepięć SVL. Wymagania w zakresie wytrzymałości napięciowej izolacji (oraz minimalnej grubości) dla przewodów połączeniowych ekranów znajdują się w [85] i odpowiadają wymaganiom dla mufy kablowej, które przedstawiono w tabeli 4.2. W przypadku przewodów koncentrycznych wymagania dotyczą izolacji pomiędzy żyłą wewnętrzną i żyłą zewnętrzną oraz żyłą zewnętrzną i potencjałem ziemi.

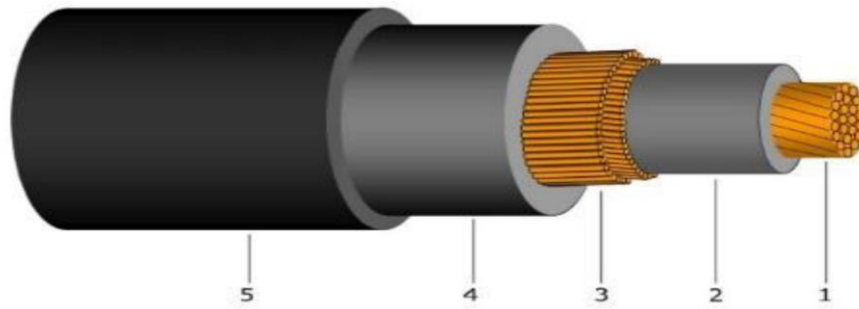
Generalnie najbardziej pożądanym jest utrzymanie możliwie jak najkrótszych długości przewodów połączeniowych ekranów, w celu ograniczenia ich impedancji udarowej, aby spełnić wymagania ochrony przed przepięciami atmosferycznymi. Przewody te mogą być w wykonaniu kabli jednożyłowych lub kabli koncentrycznych. Przekrój przewodów powinien być dobrany na spodziewany maksymalny prąd zwarciovowy, a izolacja powinna spełniać wymagania wytrzymałości napięciowej, na jakie dany przewód jest narażony. Przewody dwużyłowe koncentryczne posiadają najlepsze parametry elektryczne, ale wprowadzają pewne trudności montażowe i są trudno dostępne na rynku. Dlatego najpowszechniej wykorzystywane są przewody jednożyłowe, których zastosowanie od strony montażowej nie nastęca trudności, ale istotne w tym przypadku jest spięcie przewodów wyprowadzonych z danej mufy kablowej w pary i wprowadzenie ich do skrzynki łączeniowej, co wykazał autor rozprawy w artykule [173].

Przewody połączeniowe ekranów posiadają izolację wytłaczaną z polwinitu PVC, polietylenu usieciowanego lub gumy etylenowo-propylenowej EPR. Wyższa wartość przenikalności elektrycznej PVC skutkuje niższą impedancją falową układu i niższą prędkością propagacji fali napięciowej. Niższa wartość przenikalności elektrycznej PE zwiększa prędkość propagacji fali napięciowej oraz zwiększa impedancję falową. Izolacja z gumy EPR wpasowuje się pomiędzy te dwa materiały w zakresie parametrów izolacyjnych. Wybór konkretnego rozwiązania musi być poprzedzony obliczeniami i doбором do danej instalacji. W przypadku linii ułożonych w gruncie zaleca się zastosowanie przewodów połączeniowych ekranów z uszczelnieniem wzdłużnym i promieniowym, aby w przypadku uszkodzenia izolacji nie spowodować ewentualnego zalania wnętrza skrzynek.

Na rysunkach 4.14 oraz 4.15 przedstawiono przykładowe konstrukcje przewodów połączeniowych ekranów metalicznych ze skrzynkami CB/UZ.



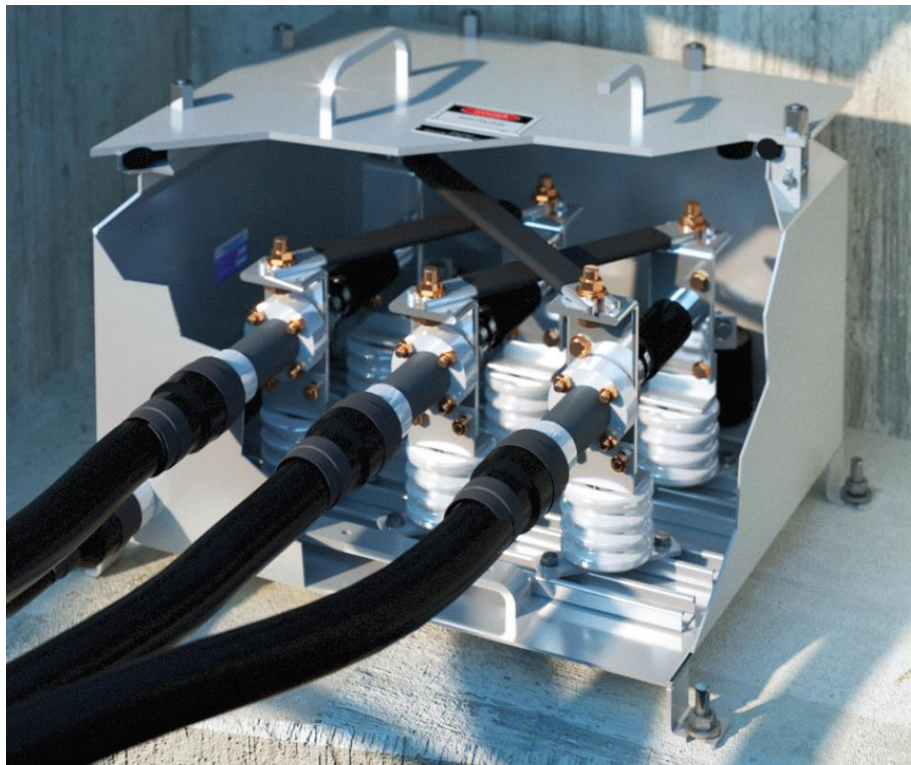
Rys. 4.14. Przykład konstrukcji przewodu połączeniowego jednożyłowego; 1-żyła, 2-izolacja, 3-osłona [161]



Rys. 4.15. Przykład konstrukcji przewodu połączeniowego dwużyłowego koncentrycznego; 1-żyła wewnętrzna, 2-izolacja wewnętrzna, 3-żyła zewnętrzna, 4-izolacja zewnętrzna, 5-osłona [161]

4.9. Skrzynki uziemiające / crossbondingowe

Skrzynki uziemiające czy crossbondingowe służą do instalacji ograniczników przepięć i/lub połączenia ekranów metalicznych z uziemieniem w układach SPB i CB, a także BE (uziemiaenie wielokrotne). Zwyczajowo posiadają one demontowane wieko i dostosowany do danego układu system połączeń wewnętrznych. Skrzynki wykonane są w sposób zapewniający ochronę od warunków, w których są instalowane / ułożone, odznaczają się stopniem ochrony IP 68, wykonane są ze stali, żeliwa lub tworzyw sztucznych [170]. Niektórzy operatorzy systemowi wymagają w swojej sieci skrzynki zawierające ograniczniki przepięć w wykonaniu przeciwybuchowym, głównie ze względu na możliwość wybuchu ograniczników SVL. Na rysunku 4.16 przedstawiono przykładową skrzynkę crossbondingową.



Rys. 4.16. Przykład konstrukcji skrzynki CB [197]

Projekt linii kablowej ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych powinien zapewniać bezpieczeństwo pod względem wystąpienia napięć dotykowych i krokowych w otoczeniu danej linii. Skrzynki powinny być zabezpieczone przed dostępem osób postronnych jeżeli linia kablowa znajduje się w eksploatacji (jest zasilona). Standardowo, skrzynki umieszcza się bezpośrednio w gruncie, odpowiednio zabezpieczonych studniach lub na słupach kablowych umieszczone poza zasięgiem.

4.10. Kable ECC

Kabel ECC (z ang. *Earth Continuity Conductor*) oznaczany w niektórych przypadkach jako NC (z ang. *Neutral Conductor*) lub PGCC (z ang. *Parallel Ground Continuity Conductor*), który wg słownika IEC należy tłumaczyć na język polski jako przewód uziemiający ciągły równoległy (IEV ref: 461-15-01) jest przewodnikiem układanym w bliskim sąsiedztwie i równoległe do linii kablowej WN z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, a jego główną funkcją jest zapewnienie drogi powrotnej prądu zwarciovego.

Podczas zwarcia w systemie, składowa zerowa prądu zwarciovego, płynie drogą możliwie „najkrótszą” tj. o najmniejszej wartości impedancji. Linia kablowa zrealizowana w układzie z uziemieniem jednostronnym poza uszkodzeniem kabla i przepływem prądu zwarcia jednofazowego w żyłę powrotnej uszkodzonej fazy nie odprowadzi prądu zwarciovego dla zwarcia powstałego poza linią kablową. Stąd w celu „kanalizacji” prądu zwarciovego, aby nie zamykał się przez ziemię (ewentualnie przez jakiegokolwiek elementy przewodzące obce znajdujące się w pobliżu linii) niezbędnym jest zapewnienie drogi powrotnej prądu. W przypadku, gdyby prąd zwarciovy miałby zamykać się przez ziemię to by spowodowało znaczny wzrost lokalnego potencjału ziemi, co w zależności od przyjętych rozwiązań technicznym mogłoby stanowić zagrożenie uszkodzenia pewnych elementów systemu i zagrożenie porażeniowe. Dlatego w przypadku linii w układzie SPB koniecznym jest instalacja dodatkowego kabla ECC w linii kablowej [85, 193, 194].

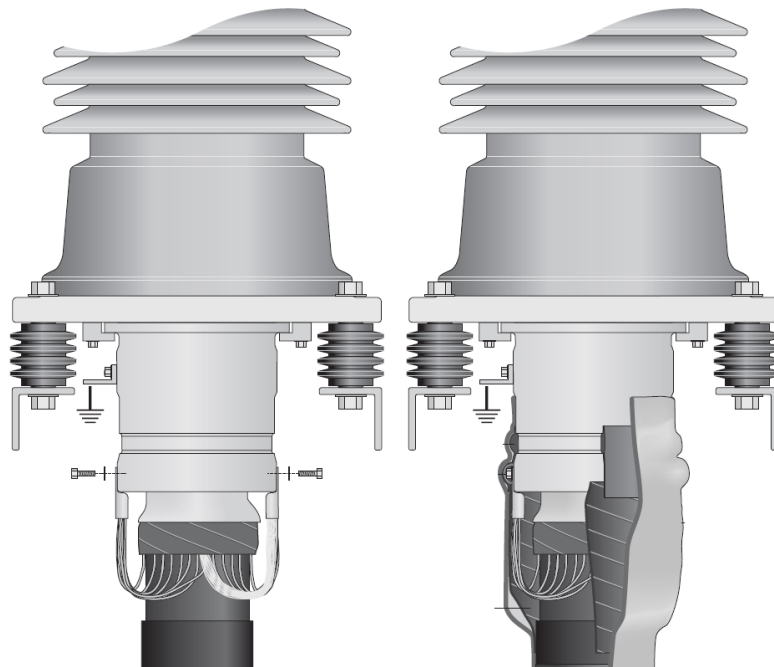
Ponadto kabel ECC instaluje się w celu zmniejszenia napięcia indukowanego w warunkach zakłóceń w układzie SPB oraz w celu poprawy warunków pracy SVL w układzie CB (zapewnienie nisko-impedancyjnego połączenia z uziemieniem skrzynek CB/UZ) [47, 48]. Dzięki indukcyjności wzajemnej oddziaływania od prądu płynącego w żyłę roboczej oraz prądu płynącego w kablu ECC napięcia indukowane wzajemnie znoszą się i pozostałe napięcie na ograniczniku jest znacznie mniejsze niż w przypadku systemu bez kabla ECC. Istotnym jest umiejscowienie kabla ECC możliwie jak najbliżej linii kablowej, aby skuteczność zmniejszenia napięć indukowanych była jak największa [19, 20, 43, 44, 45].

Należy mieć na uwadze fakt, że w kablu ECC, podobnie jak w każdym równoległe ułożonym wzdłuż linii kablowej przewodniku, zostanie wymuszony przepływ prądu [173], dlatego kabel ECC należy w odpowiedni sposób instalować, co jak wspomniano wcześniej, polega na przełożeniu fizycznym kabla ECC w połowie długości linii kablowej na drugą stronę osi linii kablowej (jako lustrzane odbicie) [85]. W przeciwnym wypadku przy obliczeniach obciążalności długotrwałej linii kablowej należy wziąć pod uwagę występowanie dodatkowego źródła ciepła.

Kabel ECC jest zazwyczaj izolowany i chroniony od wpływu środowiska, w którym jest ułożony, aby zapobiec korozji elektrochemicznej. Poziom znamionowy izolacji kabla ECC stanowi element doboru przez projektanta konfigurującego system kablowy. W powszechnie stosowanych w liniach kablowych kablach ECC poziomy wytrzymałości napięciowej izolacji wynosi minimum 1000 V, choć niektórzy operatorzy wprowadzają dodatkowe minimalne wymagania dotyczące grubości izolacji XLPE, która powinna wynosić co najmniej 3,3 mm [161].

4.11. Izolatory wsporcze pod głowice kablowe, kołnierze zacisków rozdzielnic w wykonaniu GIS

W praktyce inżynierskiej na podstawie [32, 85, 168] przyjęto jako standard montaż głowic kablowych w liniach 110 kV na płytce bazowej na izolatorach wsporczych o napięciu znamionowym 7,5 kV lub 10 kV przedstawionych na rysunku 4.17.



Rys. 4.17. Płytki bazowej głowicy kablowej z izolatorami wsporczymi, prod. Pfisterer [195]

W niektórych sytuacjach, zwłaszcza w przypadku zastosowania układu z jednostronnym uziemieniem, wytrzymałość napięciowa izolacji tych izolatorów może być niewystarczająca. Dlatego należałoby zgodnie z rekomendacjami zawartymi w [161] przeprowadzić dobór parametru wytrzymałości napięciowej, podobnie jak ma to miejsce w przypadku przewodów połączeniowych ekranów. Ten wymóg dotyczy również kołnierzy zacisków w rozdzielnicach typu GIS (ang. *Gas Insulated Switchgear*) w przypadku wprowadzenia linii kablowej do wnętrza rozdzielnicy, które podobnie jak izolatory wsporcze płytki bazowej pod głowicę kablową narażone są na działanie:

- amplitudy udarowej fali napięciowej spowodowanej wyladowaniami atmosferycznymi lub łączeniowymi,
- indukowanych przepięć dorywczych,
- napięcia podczas przeprowadzania próby szczelności powłoki kabla.

4.12. Wzrost lokalnego potencjału ziemi

Potencjalnie niebezpieczne wartości napięć mogą pojawić się na elementach systemu kablowego z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych. W pewnych sytuacjach wartości tych napięć mogą stanowić podstawę dla wyboru konkretnego rozwiązania technicznego, co może mieć wpływ na parametry poszczególnych urządzeń wchodzących w skład linii kablowej, między innymi na ograniczniki przepięć SVL. Odpowiednie środki techniczne należy przedsięwziąć w celu ograniczenia do minimum ryzyka związanego z konfiguracją systemu kablowego kontekście zapewnienia bezpieczeństwa personelu i urządzeń [10, 47, 48, 128, 140].

W zakresie pracy ograniczników i ich konfiguracji w systemie kablowym bardzo istotną kwestią stanowi wzrost lokalnego potencjału ziemi EPR (ang. *Earth Potential Rise*), spowodowanego przepływem prądu zwarciovego do uziemienia. Zakładając, że system kablowy wyposażono w kabel ECC, napięcie zaindukowane w ekranie metalicznym kabla powinno być odnoszone do potencjału żyły kabla ECC [47]. W niektórych specyficznych warunkach (prowadzenie linii kablowej na terenie stacji elektroenergetycznej) należy zwrócić szczególną uwagę na pracę ograniczników przepięć SVL w konfiguracji z uziemieniem jednostronnym, co zostało opisane w rozdziale 3 obejmującym przegląd literatury. Obszar ten stanowi odrębną bardzo obszerną tematykę poruszającą kwestie ochrony przeciwporażeniowej w kontekście wynoszenia potencjału uziemienia stacji poza jej teren [90, 113, 140, 144, 186, 194] i nie stanowi części niniejszej rozprawy, niemniej jednak jest zagadnieniem istotnym biorąc pod uwagę projektowanie linii kablowej.

Wzrost lokalnego potencjału ziemi jest kwestią istotną w zakresie doboru konfiguracji i parametrów ograniczników przepięć pracujących w układzie CB, gdzie standardowo nie układa się dodatkowego kabla ECC i warunki pracy SVL zależą w dużym stopniu od rezystancji uziemienia skrzynki CB. W celu ograniczenia ryzyka związanego z pracą ograniczników przepięć w układzie CB należy rozważyć dodatkowe ułożenia wzdłuż danej linii kablowej kabla ECC [173].

Dokładne wyznaczenie wartości wzrostu lokalnego potencjału ziemi i obliczenie napięć występujących na zaciskach ograniczników przepięć jest bardzo złożonym procesem obliczeniowym związanym ze szczegółową analizą rozplywu prądów zwarciovych w całym analizowanym układzie [40, 128], co realizuje się przy pomocy metod opisanych w dalszych częściach niniejszej pracy. Niemniej jednak wyniki tych obliczeń zależą w bardzo dużym stopniu od danych użytych do ich wykonania, a niektóre dane, jak na przykład rezystancja uziemienia, zależą ściśle od warunków środowiskowych, stąd należy mieć świadomość, że otrzymane wyniki będą orientacyjne.

W sytuacji, kiedy należałoby chronić SVL przed wzrostem lokalnego potencjału ziemi następujące zabiegi mogą zostać zastosowane:

- punkt gwiazdowy połączenia SVL może zostać odizolowany od potencjału ziemi lokalnej, w tym przypadku należy liczyć się, że ochroną objęte będą wyłącznie przekładki izolacyjne muf kablowych (brak ochrony osłon zewnętrznych kabla), dodatkowo należy zweryfikować odstęp izolacyjny w skrzynce CB czy spełniają wymagania wytrzymałości napięciowej w odniesieniu do EPR,
- połączenie SVL w trójkąt, również zakładając powyższe warunki,
- dla linii z zastosowanym krzyżowaniem ekranów – ułożenie dodatkowego kabla ECC.

5. Autorska procedura doboru i zastosowania ograniczników przepięć (SVL) w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych

5.1. Ograniczniki przepięć (SVL)

Ogranicznik przepięć przeznaczony do ochrony osłon kabli pracujących w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych – SVL, nie różni się od standardowego ogranicznika przepięć pod względem budowy i technologii wykonania. Jest to praktycznie to samo urządzenie, któremu nadano specjalną nazwę. SVL, podobnie jak ma to miejsce w przypadku pozostałych ograniczników przepięć wykonanych z tlenków metali, są produkowane i testowane wg normy PN-EN 60099-4 [147]. Niemniej jednak warunki pracy SVL są w większości przypadków odmienne od tych, w których pracują standardowe ograniczniki przepięć, stąd też wynika odrębne nazewnictwo. Ograniczniki SVL wykorzystywane są jako urządzenia do ochrony przed przepięciami natury atmosferycznej i łączeniowej elementów systemu kablowego z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Przykład zainstalowanych SVL w skrzynce CB zaprezentowano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Przykład instalacji SVL w układzie CB w skrzynce [200]

Odpowiedni dobór parametrów ograniczników przepięć SVL jest istotny z kilku względów. Przede wszystkim po to, aby ograniczyć wartość amplitudy przepięć udarowych (atmosferycznych, łączeniowych, biorąc pod uwagę również typ i długość przewodów uziemiających/połączeniowych ekranów), które mogłyby spowodować przebicie izolacji (parametry wytrzymałości napięciowej przedstawiono w rozdziale 4.5) elementów systemu kablowego WN z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, tj. m.in: osłony zewnętrznej kabla, przekładek izolacyjnych muf separacyjnych, izolacji przewodów uziemiających łączących ekrany metaliczne ze skrzynkami CB,

izolatorów wsporczych głowic kablowych (w przypadku układu SPB) i innych. Na przykład w sytuacji uszkodzenia (przebicia) osłony zewnętrznej kabla, z dużym prawdopodobieństwem doszłoby do penetracji wody w warstwę ekranu metalicznego, który w krótkim czasie uległby korozji. Dodatkowo w miejscu uszkodzenia powstałoby zamknięcie się obwodu elektrycznego przez ziemię, powodując przepływ prądów powłokowych, a te skutkowałyby zwiększeniem strat przesyłowych i lokalnym wzrostem temperatury izolacji kabla, co w konsekwencji mogłoby doprowadzić do degradacji izolacji i jej przebicia powodując awarię linii kablowej.

SVL mogą być produkowane w wykonaniu wewnętrznym jak i napowietrznym, choć rozwiązanie napowietrzne nie ma uzasadnienia technicznego, praktycznie w każdej sytuacji urządzenia te są instalowane w dedykowanych skrzynkach / obudowach o odpowiednim stopniu ochrony IP.

Generalną zasadą doboru ograniczników przepięć pracujących jako SVL jest określenie parametru napięcia trwałej pracy powyżej wartości największego napięcia o częstotliwości sieciowej (napięcia indukowanego), jakie może pojawić się na jego zaciskach w sytuacji awaryjnego przewodzenia prądu zwarciovego przez linię kablową. Stąd przyjmuje się, że ograniczniki te nie rozpraszają energii w przypadku przepięć dorywczych. Parametr znamionowej wytrzymałości na przepięcia dorywcze (TOV) dla SVL, mógłby zostać wykorzystany do zapewnienia skuteczniejszej ochrony od przepięć i dobrania niższej wartości napięcia trwałej pracy SVL pod pewnymi warunkami, które zostały opisane w rozdziale 5.3.

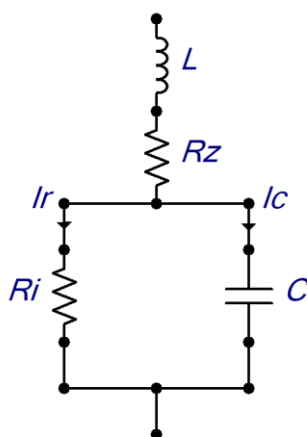
Dobór parametrów ogranicznika do konkretnej instalacji jest kompromisem pomiędzy utrzymaniem poziomu ochrony, odpornością na przepięcia dorywcze, których amplituda zależy od długości sekcji CB lub odcinka linii kablowej dla układu SPB i zdolnością pochłaniania energii, a stopniem skomplikowania instalacji w ramach konfiguracji systemu kablowego. Wybór wyższego napięcia znamionowego ogranicznika zmniejsza narażenie na warunki, które mogłyby zmniejszyć jego żywotność, ale pogarsza skuteczność ochrony od przepięć dla danego poziomu izolacji. Zastosowanie SVL z większą zdolnością pochłaniania energii ogranicza ryzyko utraty jego stabilności cieplnej, ale znacznie podraża koszty inwestycyjne.

Osiągnięcie optymalnych parametrów ogranicznika SVL zależne jest przede wszystkim od tego, jak dokładnie określono warunki jego pracy w systemie, na jakie będzie narażony. Istotnym z punktu widzenia doboru jest również skorelowanie danych prezentowanych w kartach katalogowych producentów i definiowanych przez normy, z warunkami rzeczywistymi, występującymi w miejscu instalacji danego ogranicznika. Dane te dotyczą m.in. doboru napięcia trwałej pracy, napięcia znamionowego, charakterystyki ochronnej, trwałości oraz warunków otoczenia. Parametry elektryczne i mechaniczne, wraz z wymiarami geometrycznymi i konstrukcją zacisków będą określały konkretny model ogranicznika do zastosowania, którego dokładne dane techniczne mogą w następnym kroku zostać zweryfikowane (walidacja). W tym rozdziale opisano wpływ tych warunków na zachowanie się ogranicznika, przy założeniu, że są one znane. Natomiast w rozdziale 6 rozprawy opisano, w jaki sposób wyznaczyć te warunki przy pomocy dostępnych metod obliczeniowych i symulacji komputerowych.

5.2. Ogólne właściwości ograniczników przepięć z tlenków metali

5.2.1. Mikrostruktura SVL

Ograniczniki przepięć SVL zbudowane są na bazie typowych warystorów, tj. materiałów ceramicznych powstałych w procesie spiekania granulatu tlenku cynku ZnO, z domieszkami innych materiałów jak np. Bi_2O_3 , CoO , Cr_2O_3 , MnO , and Sb_2O_3 . Materiał warystora (wypiekany w postaci dysku) posiada strukturę ziarnistą, w której poszczególne ziarna (o wielkości ok $10\ \mu\text{m}$) o bardzo małej rezystywności otoczone są warstwą nieprzewodzącego tlenku (o grubości ok $0,1\ \mu\text{m}$). Warystor pod względem elektrycznym można zastąpić obwodem zaprezentowanym na rysunku 5.2, w którym R_i odpowiada nieliniowej rezystancji warstw spieczonego granulatu, którego rezystywność zmienia się od wartości ok $10^8\ \Omega\text{m}$ do ok $0,01\ \Omega\text{m}$ w zależności od wartości przyłożonego poziomu napięcia. R_z wynosi ok $0,01\ \Omega\text{m}$. L odpowiada indukcyjności warystora, która zależna jest od geometrii przepływu prądu w dysku. W zależności od zastosowanego procesu technologicznego pojemność obwodu zastępczego C definiowana jest przenikalnością elektryczną o wartości względnej wynoszącej ϵ_r pomiędzy 500 a 1200 [121].



Rys. 5.2. Schemat zastępczy warystora

5.2.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa U-I

Typowa charakterystyka napięciowo-prądowa U-I warystora/ogranicznika została zaprezentowana na rysunku 5.3 i przedstawia zależność maksymalnych wartości chwilowych (amplitud) przyłożonego napięcia oraz składowej czynnej I_R prądu ogranicznika. Składowa pojemnościowa I_C została naniesiona na wykres wyłącznie w celu poglądowym. Analizując mechanizm przewodzenia prądu przez warystor można wyróżnić 3 podstawowe obszary charakterystyki U-I.

- Obszar o niskiej wartości natężenia pola elektrycznego (region 1) – praca w warunkach napięcia o częstotliwości sieciowej

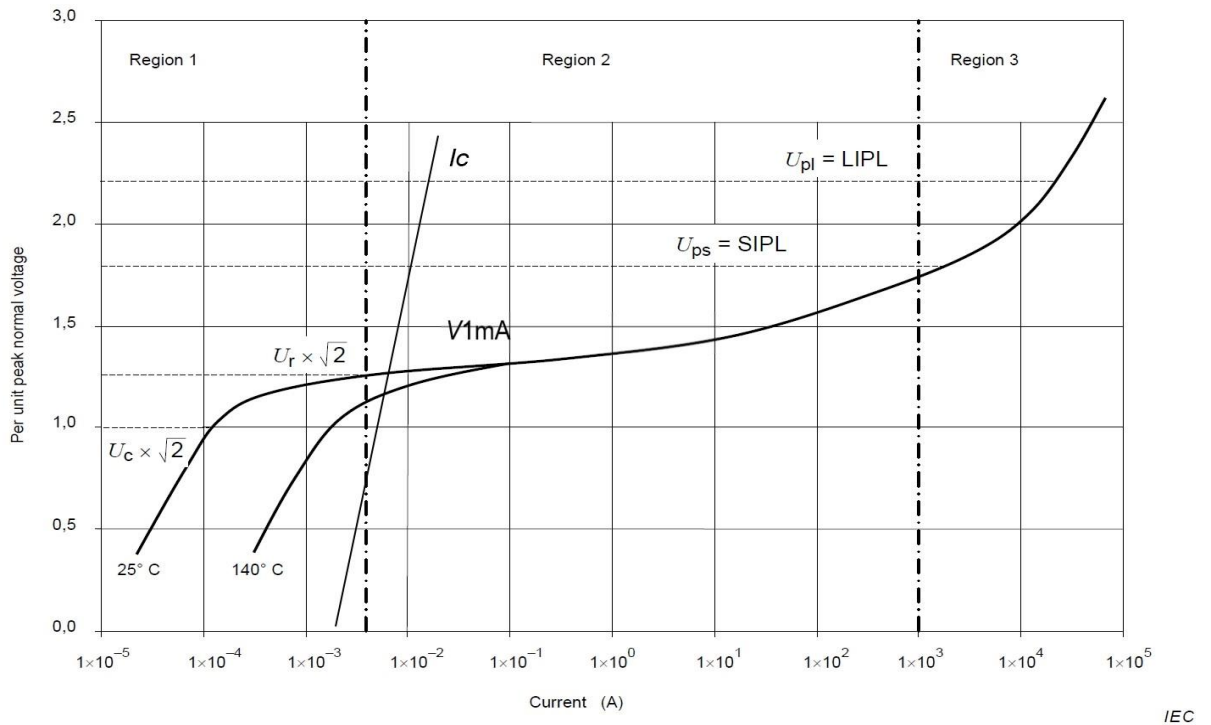
Obszar ten przedstawia zachowanie warystora/ogranicznika w czasie normalnej pracy, gdy mamy do czynienia wyłącznie z prądem upływnościowym rzędu kilku mA, o charakterze głównie pojemnościowym. Składowa czynna prądu wynosi kilka μA i jej wartość jest silnie zależna od temperatury warystora oraz technologii produkcji (wyboru

konkretnych materiałów przez producenta), stąd parametr ten może być różny dla różnych wytwórców. W przypadku przewodzenia impulsu prądowego (np. wyładowania atmosferycznego) przekraczającego wartość znamionową warystora, wykres U-I ogranicznika przesunie się trwale w dół i/lub w prawo w rezultacie powodując zwiększenie wartości prądu upływnościowego, co powoduje zwiększenie jego temperatury pracy i może w konsekwencji skutkować jego uszkodzeniem, dlatego pomiar prądu upływnościowego jest aktualnie najlepszym sposobem weryfikacji stanu technicznego danego ogranicznika. Warstwy nieprzewodzących tlenków są barierami energetycznymi dla ładunków elektronowych, w przypadku wyższych temperatur warystora i podanego napięcia dochodzi do zjawiska emisji termoelektronowej w warystorze, z tego względu wynika zależność charakterystyki U-I warystora w obszarze prądów upływnościowych od temperatury.

Istotną kwestią wynikającą z pracy ogranicznika w regionie 1 jest zdefiniowanie kilku podstawowych parametrów, które stanowią podstawę późniejszego doboru konkretnych urządzeń do ochrony od przepięć, tj.:

- U_C – napięcie trwałej pracy ogranicznika (parametry znamionowe odnoszą się do wartości skutecznej, charakterystyka U-I przedstawia wartości amplitud), stanowi maksymalną wartość napięcia, jaka może być doprowadzona trwale do zacisków ogranicznika. Zgodnie z normą [146] zazwyczaj maksymalne napięcie systemu ($1,05 \times U$) powinno wynosić nie więcej niż 95% U_C , przyjmuje się rezerwę 5% na wypadek występowania w systemie harmonicznych napięcia [122]. Napięcie trwałej pracy jako parametr definiowany przez producenta jest wartością, która uwzględnia efekty starzeniowe poszczególnych elementów składowych ogranicznika oraz możliwy niejednorodny rozkład napięcia na stosie warystorów oraz ewentualne efekty degradacji elektrycznej pod wpływem narażenia na przepływ prądów udarowych;
- U_R – napięcie znamionowe, jest to najwyższa dopuszczalna wartość skuteczna napięcia częstotliwości sieciowej między zaciskami ogranicznika, która zapewnia jego poprawne działanie w warunkach przepięcia dorywczego, którego maksymalny czas trwania został ustandaryzowany i wynosi 10 s. Niektórzy producenci wydłużają ten czas do 1000 s, niemniej jednak powyżej tej wartości ogranicznik traci stabilność cieplną, co może prowadzić do kumulacyjnego wzrostu temperatury i powstania zjawiska rozbiegania cieplnego, kończącego się uszkodzeniem [74].

Napięcie trwałej pracy ogranicznika i napięcie znamionowe ogranicznika są ze sobą ściśle związane, pomijając kilka wyjątków. Stosunek U_R/U_C wynosi 1,25 i jest niezależny od przyjętego reżimu technologicznego produkcji ograniczników.



Rys. 5.3. Typowa charakterystyka napięciowo-prądowa warystora na podstawie [146]

b) Obszar o średniej wartości natężenia pola elektrycznego (region 2)

Po przekroczeniu pewnej wartości napięcia impulsowego (dane eksperymentalne wskazują na wartość od około 2 do 4 V pomiędzy sąsiadującymi ziarnami ZnO, która zależna jest od technologii domieszkowania) [34], warystor przechodzi w stan przewodzenia. Jak dotąd powstało wiele teorii tłumaczących to zjawisko, co świadczy o tym, że nie do końca jesteśmy pewni jak ten proces przebiega. Najpowszechniejszym, i przyjętym w opracowaniach CIGRE [121, 122], jest efekt tunelowania (transportu elektronów poprzez utworzone tunele w barierach z tlenków), choć ostatnimi czasy powstało kilka bardziej dopracowanych teorii [34]. Niemniej jednak, w obszarze 2 proces ten zostaje zainicjowany. W miejscu przekroczenia charakterystycznego punktu załamania wykresu U-I (punkt oznaczony jako $V1mA$), rezystancja warystora gwałtownie maleje, co powoduje przewodzenie prądu. Charakterystyka U-I w tym obszarze jest niezależna od temperatury warystora, stąd też możliwe jest precyzyjne zamodelowanie jej przebiegu dla wyższych wartości prądu przewodzenia. Podczas normalnej eksploatacji wartość szczytowa napięcia o częstotliwości sieciowej nie powinna osiągnąć wartości $V1mA$, w przeciwnym razie doszłoby do przegrzania ogranicznika i ograniczyło by znacznie zdolność wytrzymałości na TOV. Różnica pomiędzy $V1mA$ a U_C stanowi o potencjale wykorzystania wytrzymałości TOV na dobór danego ogranicznika [189].

c) Obszar o wysokiej wartości natężenia pola elektrycznego (region 3)

W obszarze tym spadek napięcia spowodowany efektem tunelowania staje się pomijalny, a charakterystyka U-I determinowana jest rezystywnością ziaren ZnO i prąd przewodzenia staje się zależny liniowo od napięcia.

Zakres ochrony napięciowej ogranicznika wyznacza jego charakterystyka U-I w regionach 2 i 3, w których to pojemność, jak również temperatura ogranicznika nie wpływają na jej przebieg. Poszczególne punkty charakterystyki wyznacza się eksperymentalnie dla danego typu ogranicznika przepięć, przy założeniu znormalizowanych kształtów krzywej udarów napięciowych wg [147]. Dane otrzymane z badań typu danego ogranicznika przepięć mają charakter dynamiczny i zmieniają się w zależności od kształtu krzywej udaru napięcia. Napięcie obniżone ogranicznika U_{res} (wartość szczytowa napięcia występującego na zaciskach ogranicznika podczas przepływu prądu wyladowczego) wzrasta wraz ze zwiększeniem stromości czola udaru. W celu sprecyzowania warunków ochrony przepięciowej w najnowszym arkuszu normy [146] wprowadzono dodatkowo dwie definicje (w ślad za wymaganiami normy IEC [145]) poziomu ochrony przed przepięciami atmosferycznymi U_{pl} (LIPL, ang. *Lightning Impulse Protective Level*) oraz poziomu ochrony przed przepięciami łączeniowymi U_{ps} (SIPL, ang. *Switching Impulse Protective Level*). Są to wartości maksymalne napięcia obniżonego ogranicznika w momencie przewodzenia znamionowego prądu wyladowczego o znormalizowanym kształcie udaru. Różnice w wartościach U_{pl} oraz U_{ps} mają znaczenie w przypadku konfiguracji modelu cyfrowego (obwodu zastępczego) ogranicznika w danych warunkach pracy, którego opis znajduje się w rozdziale 6 rozprawy.

5.2.3. Czynniki degradujące przebieg charakterystyki U-I

Na pogorszenie parametrów ograniczników przepięć, a w szczególności na przebieg charakterystyki U-I (degradacja elektryczna warystorów), czyli tym samym na zakres ochrony przepięciowej mogą mieć wpływ następujące czynniki:

- reakcje chemiczne warstwy granulatu, a dokładniej tlenków z medium otaczającym (rodnikami), które mogłyby być produktem powstałym w trakcie eksploatacji w miejscu, w którym dane ograniczniki zainstalowano np. jako skutek wyladowań niepełnych (w celu zapobieżenia potencjalnym reakcjom chemicznym warystory montuje się w specjalnych obudowach zabezpieczających przed ewentualnym wnikaniem rodników);
- starzenie materiału pod wpływem przyłożonego napięcia trwałej pracy, którego stopień i szybkość zależą przede wszystkim od jakości danego wyrobu;
- prąd przewodzenia (prąd zadziałania ogranicznika), który lokalnie (choć w niewielkim stopniu) uszkadza strukturę granulatu. Energia, która jest wydzielona w ograniczniku podczas jego zadziałania przy przepięciach szybkozmiennych tj. w czasie kilku mikrosekund, powoduje lokalny, ekstremalny i nagły wzrost temperatury powodujący powstanie sił mechanicznych, które mogą doprowadzić do pęknięć struktury warystora lub jego przelamania. Stąd producenci w danych znamionowych definiują maksymalną zdolność pochłaniania energii w przypadku impulsowego zadziałania ogranicznika, która wynika z jakości użytych materiałów i przyjętego procesu technologicznego produkcji [121].

Współcześnie, do produkcji ograniczników przepięć wykorzystuje się materiały, które charakteryzują się dużą odpornością na powyższe czynniki. Norma [147] wymaga

od producentów bardzo rygorystycznych badań potwierdzających stałość parametrów technicznych tych urządzeń, co ma zapewnić ich bezproblemową i bezobsługową eksploatację, w odróżnieniu od starszych konstrukcji znajdujących się jeszcze w użyciu. To właśnie z powodu niedojrzałości poprzednich technologii produkcji ograniczników przepięć istnieje pogląd o awaryjności tych urządzeń, który odzwierciedla zwiększone zaangażowanie ekip serwisowych w czynnościach eksploatacyjnych. Niemniej jednak w wielu publikacjach, m.in. w [161], zaleca się przyjęcie pewnych dodatkowych tzw. marginesów bezpieczeństwa w zakresie parametrów ogranicznika, które opisano w rozdziale 5.3.

5.2.4. Stabilność cieplna ogranicznika

Ustalając warunki pracy ograniczników przepięć w systemie elektroenergetycznym poza określeniem parametrów napięcia trwałej pracy oraz poziomu ochrony wynikającego z charakterystyki U-I, należy wziąć pod uwagę zdolność pochłaniania energii przez ogranicznik i możliwość oddawania tej energii do otoczenia. Dobór odpowiedniej zdolności pochłaniania energii konieczny jest ze względu na to, aby nie doprowadzić do rozbiegania cieplnego (utrata stabilności cieplnej) ogranicznika [147]. Proces ten wymaga indywidualnego podejścia dostosowanego do sposobu i miejsca instalacji danego urządzenia w konkretnych warunkach.

Stabilność cieplną ogranicznika przepięć definiuje się jako największy poziom energii wydzielonej w ograniczniku, nie powodującej jego uszkodzenia, po której ogranicznik może jeszcze powrócić do normalnej temperatury pracy. Na rysunku 5.4 przedstawiono graficznie to zagadnienie. Straty cieplne, spowodowane przepływem prądu przez ogranicznik przy danym napięciu pracy, zależą od jego temperatury i wzrastają w stosunku wykładniczym zgodnie z poniższą zależnością [34]:

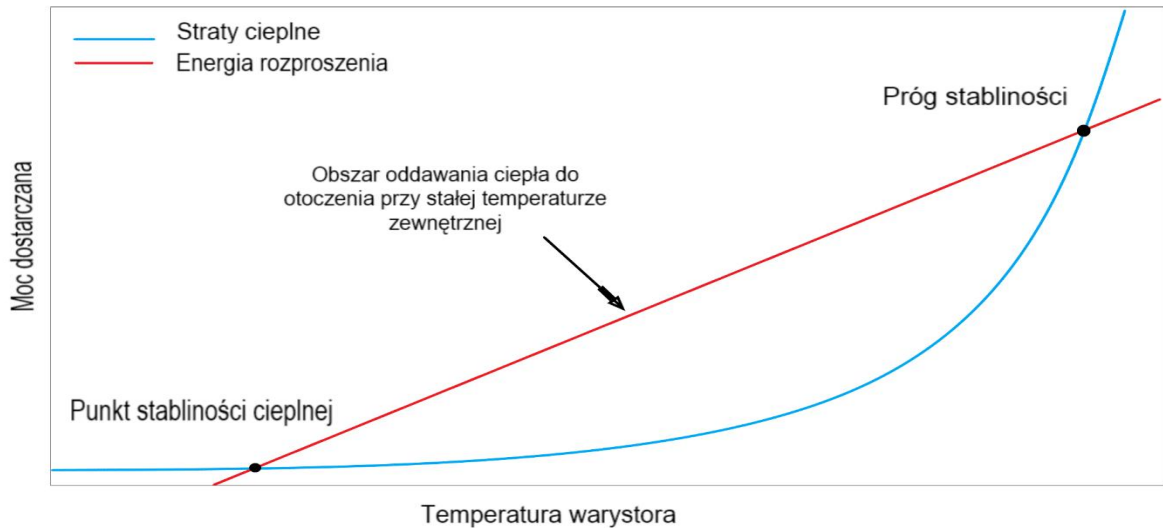
$$P = Ae^{-\left(\frac{W}{kT}\right)} \quad (5.1)$$

gdzie: A jest współczynnikiem zależnym od wartości przyłożonego napięcia i materiału warystora, W - stanowi ilość wydzielanej w warystorze energii, k – stała Boltzmann, T – temperatura warystora.

Ogranicznik może rozproszyć do otoczenia tylko ograniczoną ilość energii cieplnej, która zależy wyłącznie od jego budowy, przyłożonego do zacisków napięcia i liniowo od temperatury samego ogranicznika. Jej zależność przedstawia wzór [34]:

$$Q = B(T - T_a) \quad (5.1)$$

gdzie: T jest temperaturą warystora, T_a stanowi wartość temperatury otoczenia, B jest współczynnikiem rozproszenia.

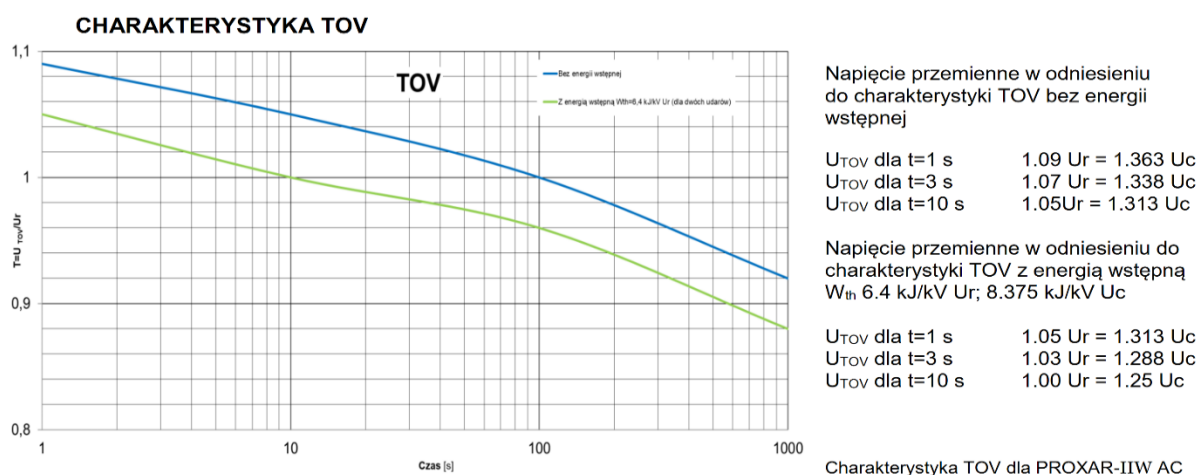


Rys. 5.4. Przedstawienie zjawiska rozbiegania cieplnego ogranicznika przepięć na podstawie [74, 121]

Charakterystyka przedstawiająca ilość wydzielanej w ograniczniku energii przecina się z charakterystyką odprowadzania energii ogranicznika w dwóch punktach wykresu. Po lewej znajduje się punkt stabilności cieplnej, w którym ilość energii wydzielonej w ograniczniku jest równa ilości energii cieplnej oddanej do otoczenia. W sytuacji zadziałania ogranicznika równowaga ta jest zaburzona, energia, która zostaje wprowadzona do układu, zwiększa gwałtownie temperaturę ogranicznika, a jego punkt pracy przesuwają się po charakterystyce w prawą stronę. Stabilność cieplna ogranicznika występuje do momentu dojścia punktu pracy ogranicznika do drugiego punktu przecięcia charakterystyk, tj. progu stabilności. W tym obszarze ilość ciepła wydzielanego w ograniczniku jest w całości oddawana do otoczenia. Po przekroczeniu progu stabilności, warunki chłodzenia są utrudnione i dochodzi do powstania zjawiska rozbiegania cieplnego. Definiowana przez producentów zdolność pochłaniania energii przez ogranicznik jest wyspecyfikowaniem warunków (z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa) limitu możliwości oddawania ciepła. Temperatura końcowa ogranicznika brana pod uwagę w tej sytuacji wynosi od 190°C do ok 220°C [74] w zależności od technologii wykonania.

Biorąc pod uwagę zdolność pochłaniania energii przez ogranicznik należy wspomnieć, że urządzenie to dedykowane jest wyłącznie do przewodzenia ograniczonej ilości ładunku związanego z wylądowaniem atmosferycznym, który w większości powinien być odprowadzony przez system uziemień. W praktyce inżynierskiej (również na podstawie poprzednich arkuszy normy [147]) przyjęło się, że zdolność pochłaniania energii przez ogranicznik jest definiowana poprzez klasę rozładowania linii. Dobór tego parametru jest procesem niebezpośrednio związanym z warunkami pracy danego ogranicznika i w przypadku ograniczników SVL jest bezcelowy. Niezbędne jest wyznaczenie i określenie konkretnej wartości energii dla jakiej utrzymana zostanie stabilność cieplna. Najnowsze wersje norm [146, 147] pomimo tego, że dopuszczają sposób doboru ogranicznika pod względem zdolności pochłaniania energii wg utartych przez dziesięciolecia praktyk (dobór klasy rozładowania linii), to jednak koncentrują się na sprecyzowaniu

dla poszczególnych typów / klas ograniczników definiowania znamionowej energii cieplnej przez producentów. Jest to maksymalna charakterystyczna energia, wyrażona w kJ/kV, która ma być pochłonięta przez ogranicznik lub sekcję ogranicznika bez spowodowania rozbiegania cieplnego. Dodatkowo, w odróżnieniu do wcześniejszych wersji norm, wymaga się aby producent ograniczników prądnic opublikował charakterystykę TOV w odniesieniu do napięcia znamionowego (rys. 5.5), która określa wytrzymałość danego typu ograniczników na chwilowe przepięcia o częstotliwości sieciowej przy wstępnym obciążeniu (wykres dolny) i bez niego, tj. bez energii wstępnej (wykres górny). W uproszczeniu charakterystyka ta obrazuje ile czasu może ogranicznik prądnic wytrzymać pracując pod podwyższonym napięciem sieci. Wg [146] parametry ograniczników prądnic SVL w zakresie charakterystyki TOV należy dobierać do wykresu „bez energii wstępnej”, niemniej jednak w przypadku zastosowania w schemacie zabezpieczenia linii automatyki SPZ (Samoczynnego Ponownego Załączenia) rekomendowanym jest wg [35, 42, 131] skorzystanie z wykresu „z energią wstępną”.



Rys. 5.5. Przykładowa charakterystyka TOV ograniczników prod. Protektel [196]

5.3. Dobór parametrów SVL

Podstawową funkcją ograniczników prądnic SVL jest ochrona przed przepięciami przekładek izolacyjnych muf separacyjnych kabli w układach z krzyżowaniem żył powrotnych oraz ochrona przed przepięciami powłok zewnętrznych kabli w przypadku układów z jednostronnym uziemieniem w miejscu instalacji danego SVL. Ochrona polega na obniżeniu amplitudy udarów napięciowych poniżej wartości wytrzymywanej przez elementy izolacyjne oraz powłokę zewnętrzną kabli WN. Urządzenia te nie są przeznaczone do ochrony powłok zewnętrznych kabli na całej długości linii kablowej.

W miejscach linii kablowej, w których ciągłość ekranu metalicznego została przerwana, a ekrany nie są połączone w tych miejscach z uziemieniem, występuje zmiana wartości impedancji falowej [9, 12, 87, 185]. W rezultacie fala przepięciowa wprowadzona do układu (z powodu wylądowania atmosferycznego, przepięcia łączeniowego, czy też z powodu występowania napięć indukowanych) w miejscach przerwania ekranu podlega zjawisku częściowego odbicia, co może spowodować podwojenie amplitudy napięcia i przekroczenie wytrzymałości napięciowej

elementów systemu kablowego [93]. Ograniczniki przepięć SVL chronią przed udarami napięciowymi natury atmosferycznej i łączeniowej, dlatego powinny być projektowane i dobierane w taki sposób, aby wytrzymały przepięcia dorywcze o częstotliwości sieciowej, indukowane w ekranach metalicznych kabli i powodowane przepływem prądów zwarciovych żyłą roboczą (biorąc pod uwagę czas wyłączenia zwarcia pod względem zastosowanej automatyki zabezpieczeniowej). Nie chronią jednak elementów systemu przed występowaniem przepięć dorywczych. Ponadto w sytuacjach zwarc wewnątrz linii kablowej mogą wystąpić przepięcia dorywcze o znacznych wartościach, przekraczających napięcia wytrzymałwane przez SVL. Jeżeli doszłoby do takiego zdarzenia, przynajmniej ograniczniki przepięć SVL znajdujące się w najbliższym sąsiedztwie miejsca zwarcia, powinny zostać zweryfikowane pod względem ponownego wykorzystania, gdyż mogą w tej sytuacji ulec uszkodzeniu.

Typowe parametry elektryczne ograniczników SVL obejmują:

- napięcie znamionowe U_r ,
- napięcie trwałej pracy ogranicznika U_c ,
- znamionowy prąd wyladowczy I_N 8/20 μ s,
- graniczny udar prądowy I_{HC} 4/10 μ s,
- udar prądowy długotrwały,
- napięcie obniżone ogranicznika,
- charakterystyka TOV,
- oznaczenie klasy (znamionowa energia cieplna/powtarzalność przepływu ładunku).

Spośród parametrów mechanicznych SVL, na które należy zwrócić uwagę w procesie doboru, jest wytrzymałość zwarciova.

Ogólną procedurę doboru ograniczników przepięć SVL zawierają następujące opracowania [68, 108, 161, 168, 192]. Na podstawie analizy tych procedur doboru ograniczników oraz uwzględniając aktualizacje norm [146, 147] i wytycznych, a także biorąc pod uwagę doświadczenia eksploatacyjne oraz praktykę autora – dobór ograniczników opracowano jako realizację poszczególnych punktów pewnego, niżej opisanego autorskiego procesu.

1. Na wstępie należy przeprowadzić obliczenia/analizę przepięć o częstotliwości sieciowej dla przewidywanej maksymalnej długości czasu trwania zwarcia w systemie (szczegółowo opisano to w rozdziale 6 rozprawy) obejmujące:
 - a. obliczenia maksymalnych wartości prądów zwarciovych trójfazowych z ziemią, dwufazowych z ziemią i jednofazowych z ziemią, których to wartości w korelacji z układem geometrycznym ułożenia kabli determinują wartości napięć indukowanych,
 - b. weryfikację wartości amplitudy składowej nieokresowej napięcia indukowanego spowodowanej przepływem prądu zwarciovego w żyłę roboczej kabla, która może być o $1.8 \times \sqrt{2}$ większa od składowej okresowej,
 - c. weryfikację konieczności doboru parametrów SVL biorąc pod uwagę zwarcia wewnątrz systemu kablowego, które mogą powodować wielokrotnie wyższe

- wartości przepięć indukowanych niż przepływ prądu zwarciovego przy zwarciu poza linią kablową,
- d. obliczenia wartości wzrostu lokalnego potencjału ziemi, w miejscu instalacji SVL,
 - e. uwzględnienie sposobu połączenia ograniczników przepięć (jednofazowe z ziemią, uziemiona gwiazda lub trójkąt).
2. W następnym kroku, porównując wartości napięć indukowanych (biorąc pod uwagę czas eliminacji zwarcia) z charakterystyką TOV wybranego typoszeregu ograniczników SVL, należy dobrać wartość napięcia trwałej pracy ogranicznika U_C . Standardowo wg [161] przyjmuje się bufor bezpieczeństwa, gdzie wartość U_{TOV} jest wyższa o ok 5% do 25% od wartości napięcia indukowanego dla danego czasu trwania zwarcia.
 3. W sytuacji, kiedy charakterystyki TOV nie są udostępnione, należy dobrać napięcie trwałej pracy ogranicznika U_C wyższe niż obliczone napięcie indukowane w miejscu instalacji SVL. Naturalnie przyjętym marginesem bezpieczeństwa w tej sytuacji jest bufor 25% wynikający z parametru stosunku napięcia trwałej pracy do napięcia znamionowego U_r .

Biorąc powyższe etapy pod uwagę zaproponowano następującą zależność określającą wartość napięcia trwałej pracy ogranicznika SVL:

$$\underline{U_C} = \frac{U_i \cdot W_u}{TOV} \cdot W_b \quad (5.2)$$

w której $\underline{U_i}$ jest wartością skuteczną napięcia indukowanego na SVL, $W_u = 1 \div 1,8$ jest współczynnikiem korekcyjnym w związku z uwzględnieniem zwiększenia wartości amplitudy z powodu występowania składowej nieokresowej napięcia indukowanego, jako skutek przepływu prądu zwarciovego, $W_b = 1,05 \div 1,25$ jest współczynnikiem korekcyjnym wprowadzającym bufor bezpieczeństwa do wartości TOV wskazanej przez producenta ogranicznika w specyfikacji technicznej.

4. Kolejnym ważnym aspektem wpływającym na dobór napięcia trwałej pracy ogranicznika SVL jest koordynacja z warunkami występującymi podczas przeprowadzenia prób szczelności powłoki zewnętrznej kabla jako niezbędny element prac eksploatacyjnych, a wykonywanych w zależności od warunków środowiskowych występujących na trasie linii, co 2 lub 5 lat. W zależności od warunków ułożenia linii kablowej, a w szczególności skrzynek CB (zakopane w gruncie) i stopnia trudności wypięcia ograniczników SVL z zacisków na czas przeprowadzenia prób (niektóre skrzynki CB z zainstalowanymi ogranicznikami SVL wypełnia się trwale żywicą epoksydową, w celu ochrony przed wnikaniem wody) niezbędnym może okazać się konieczność przeprowadzenia pomiarów szczelności powłoki kabla z zainstalowanymi ogranicznikami SVL. Pomiary te wykonuje się napięciem stałym o wartości zależnej od stanu technicznego linii kablowej i materiału powłoki, standardem dla nowych instalacji wg [78, 155] jest wartość 4 kV na 1 mm grubości powłoki i nie więcej niż 10 kV DC przez 1 min. Rekomendacje międzynarodowe [42, 161] wskazują, że wartość ta jest zbyt duża dla linii będących w eksploatacji i może w trakcie wykonywania pomiarów dojść do uszkodzenia powłoki

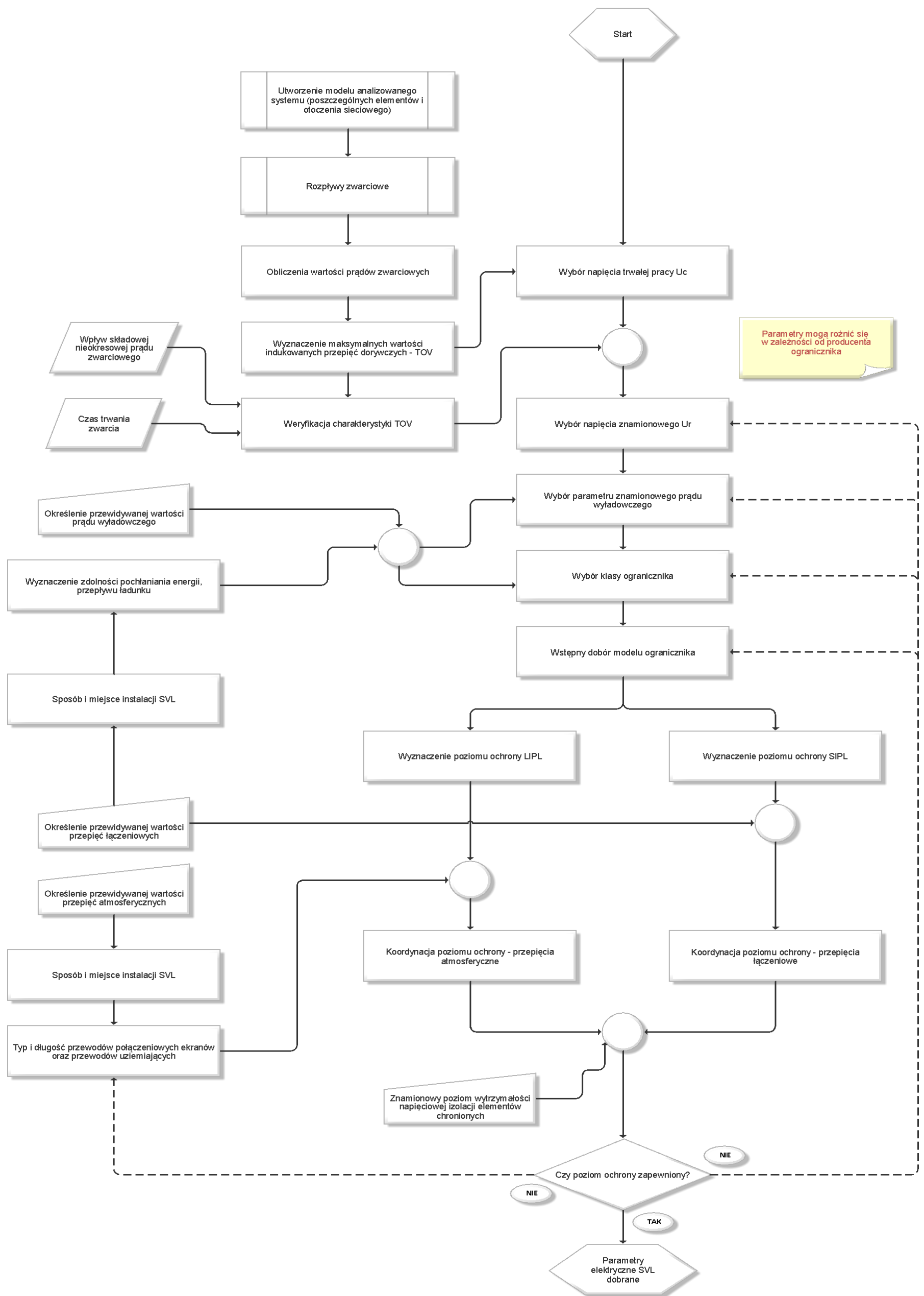
zewnątrznej kabla, stąd zaleca się nieprzekraczanie 5 kV DC. W celu ograniczenia czasu i kosztów przeprowadzenia prób szczelności powłoki, opcjonalnie w uzgodnieniu z operatorem danego systemu kablowego, możliwe jest dobranie w taki sposób parametrów ograniczników SVL i wartości napięcia próby szczelności powłoki, aby pomiary te wykonywać bez wypinania ograniczników z zacisków.

5. Napięcie znamionowe U_r ogranicznika jest parametrem wynikającym z dobranej wartości napięcia trwałej pracy U_c , koordynacji przebiegu charakterystyki TOV względem napięć indukowanych i weryfikacji zdolności pochłaniania energii wynikającej z klasy danego ogranicznika, co jest następnym krokiem w doborze jego parametrów. SVL powinien zaabsorbować bez uszkodzenia energię związaną z przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi. Norma [145] wskazuje konieczność przeprowadzenia analizy maksymalnej charakterystycznej zdolności przepływu ładunku dla każdego przypadku indywidualnie. Doświadczenia eksploatacyjne potwierdzone obliczeniami [95, 109, 149] (z powodu elementów nieliniowych wykonanych jedynie w oparciu o techniki komputerowe) wskazują, że w przypadku linii z zastosowanym CB, przepięcia łączeniowe nie stanowią istotnego elementu wpływającego na dobór SVL, w większości sytuacji zdolność pochłaniania energii jest znacznie większa od energii wydzielonej w ograniczniku z powodu udarów łączeniowych. Natomiast w przypadku długich linii z zastosowanym układem SBP lub długich linii, w których ostatnią sekcję zrealizowano jako SPB, przepięcia łączeniowe odznaczają się znaczącym poziomem energii, który wobec specyfikacji SVL należy wziąć pod uwagę [8, 12, 88, 92]. Wyznaczoną poprzez symulacje komputerowe ilość energii, jaka może w danych warunkach wydzielć się w ograniczniku należy porównać z danymi katalogowymi producenta. Należy pamiętać, że elementem wpływającym na ilość energii, na jaką ogranicznik SVL jest narażony stanowi dobór parametrów ogranicznika do ochrony izolacji roboczej kabla WN. W odniesieniu do udarów napięciowych pochodzenia atmosferycznego zdolność pochłaniania energii wg [161] należy przyjąć na poziomie 10 kA dla standardowego kształtu fali prądowej, jednak należy liczyć się z faktem, że wartość ta nie stanowi podstawowego parametru pod względem zdolności energetycznej ogranicznika, zazwyczaj są to przepięcia łączeniowe oraz udary napięciowe o częstotliwości sieciowej. Szczegółowe warunki doboru tego parametru należy przeprowadzić przy pomocy analiz w oprogramowaniu EMTP, przyjmując temperaturę graniczną o wartości 105°C, która wg [73] nie ma wpływu na degradację parametrów elektrycznych. SVL są dostępne w kilku różnych klasach, które bazują na różnych poziomach zdolności pochłaniania energii. Generalnie klasa ogranicznika oznacza stopień trwałości danego ogranicznika. Ogólnie przyjęte jest, że Klasa 1 dotyczy ochrony przed przepięciami atmosferycznymi, Klasa 2 ochrony od przepięć łączeniowych. Wg nowego arkusza normy [146] z roku 2018 klasyfikacja ograniczników uległa zmianie i rozróżnia się klasy stacyjne i dystrybucyjne z podziałem na 3 poziomy odporności – niski (ang. *Low*), średni (ang. *Medium*) i wysoki (ang. *High*), a oznaczenie poszczególnych klas jest następujące: SH, SM, SL, DH, DM, DL. Należy zaznaczyć, że ograniczniki przepięć wytrzymują bez uszkodzenia znacznie większe udary prądowe niż wynika to z ich klasy,

istotną informacją jest to, że dla znamionowego prądu wyladowczego zapewnione są podane przez producentów charakterystyki ochrony danego ogranicznika. Przy impulsie prądowym przekraczającym wartość znamionową, wartość napięcia obniżonego będzie wyższa niż deklarowana przez producenta.

6. Po wyspecyfikowaniu wszystkich powyższych parametrów z punktów 2-5 i wybraniu konkretnego typu i modelu ogranicznika przepięć SVL, kolejnym krokiem jest odpowiedni dobór poziomu ochrony jako parametru napięcia obniżonego U_{res} , a dokładnie poziomu ochrony przed przepięciami atmosferycznymi U_{pl} oraz poziomu ochrony przed przepięciami łączeniowymi U_{ps} , których wartość powinna być mniejsza niż wytrzymałość napięciowa udarowa przekładek izolacyjnych muf oraz osłony zewnętrznej kabla. W przypadku osłony zewnętrznej kabla 110 kV norma [146] zaleca przyjęcie wartości napięcia obniżonego o możliwie najniższej wartości, głównie ze względu na fakt, że wytrzymałość napięciowa powłoki zewnętrznej kabla, jeżeli nie jest w wykonaniu specjalnym, nie jest określona w standardach, jak również nie jest sprecyzowany sposób badania tego parametru (przeprowadza się wyłącznie próbe szczelności powłoki). W Polsce przyjmuje się, w uzgodnieniu z producentem kabla, zazwyczaj poziom ok 20-22,5 kV wytrzymałości impulsowej powłoki zewnętrznej, dla kabla po ułożeniu (zmniejszenie o ok 40% wartości w stosunku do parametrów normowych wynika z dopuszczalnego poziomu uszkodzeń w trakcie montażu – rysy i zadrapania powłoki zewnętrznej powstałe podczas przeciągania kabla, a także efektów starzeniowych). Parametr U_{res} , który zależy od wybranej klasy ogranicznika, należy wyznaczyć w koordynacji ze spadkiem napięcia na przewodach uziemiających i przewodach połączeniowych ekranów w przypadku układów CB [168, 93], procedurę sprawdzenia zawiera rozdział 6 rozprawy. Przewody te mogą być różnej konstrukcji i typu, a ich indukcyjność w znaczący sposób może wpłynąć na wartość spadku napięcia. W tym przypadku należy również wziąć pod uwagę pewien margines bezpieczeństwa, wynoszący wg [29, 84, 90, 145, 150] od 15 do 40% na wypadek pogorszenia stanu izolacji w czasie, kształtu udaru napięciowego, niejednorodności poszczególnych typów i wyrobów SVL jako wynik procesu produkcyjnego. W sytuacji spełnienia wymagań, proces doboru SVL uznaje się za zakończony, w przeciwnym wypadku, tj. gdy wymagany jest wyższy poziom ochrony należy ponownie podejść do specyfikacji poszczególnych parametrów przy doborze niższego napięcia trwałej pracy i/lub wyższej klasy ochrony ogranicznika i ponownie przeprowadzić proces sprawdzenia poziomu ochrony. Jeżeli nie ma technicznej możliwości wyboru konkretnego urządzenia, należy zweryfikować inne działania korygujące związane z pozostałymi elementami systemu kablowego i ponownie skoordynować prace zmierzające do wyznaczenia parametrów SVL.

Proponowany przez autora rozprawy kompleksowy proces doboru parametrów elektrycznych ograniczników SVL, tj. powyższy opis jako proces iteracyjny, przedstawiono na rysunku 5



Rys. 5.6. Autorski proces doboru parametrów ograniczników przepięć SVL jako modyfikacja procesu zawartego w normie IEC [146]

Od strony mechanicznej w odniesieniu do ograniczników SVL należy wziąć pod uwagę dobór parametru wytrzymałości zwarciowej. Według [35, 42, 131] wytrzymałość zwarciowa dobieranego ogranicznika, powinna zapewniać wytrzymywanie przepływu prądów zwarciowych bez gwałtownego rozerwania osłony i powinna być większa lub równa największej wartości prądu zwarcia jednofazowego w miejscu zainstalowania ogranicznika. Informacja ta jest niepełna, a wymóg sprecyzowany w przywołanych standardach PSE nie ma uzasadnienia praktycznego. Ogranicznik SVL w żadnej konfiguracji połączeń nie jest narażony na oddziaływanie pełnej wartości prądu zwarciowego. W szczególnych przypadkach, przy założeniu występowania kilku niepożądanych zdarzeń mających miejsce w tym samym momencie dla układu SPB, których prawdopodobieństwo wystąpienia w tym samym czasie jest znikome, ogranicznik może przewodzić wyłącznie część prądu zwarciowego [39].

Jednym z kluczowych elementów, które należy wziąć pod uwagę jest fakt, że ograniczniki przepięć są urządzeniami nieprzystosowanymi do pracy w warunkach zwarciowych. Wytrzymałość zwarciowa beziskiernikowych ograniczników przepięć zdefiniowana w normach [146, 147] odnosi się wyłącznie do kwestii przepływu prądu zwarciowego, jako wynik uszkodzenia części aktywnej ogranicznika czyli warystorów / stosu warystorów, i polega na zapobieżeniu gwałtownego rozerwania obudowy ogranicznika i niepodtrzymywania ognia. Nie należy interpretować tego parametru w inny sposób np. w oparciu o wymagania dla urządzeń i aparatów elektrycznych, gdyż procedura testowa jest odmienna. Drugim aspektem jest czas trwania zwarcia, który w przypadku linii 110 kV wynosi w zależności od operatora systemu dystrybucyjnego 0,5 s i więcej, a procedury testowe ograniczników wg standardów [146, 147] mówią o wartości wyłącznie dla czasu nieprzekraczającego 0,2 s oraz dla dłuższych czasów – 1 s, ale przy założeniu przepływu prądu zwarciowego o wartości 600 A. Weryfikując potencjalne narażenie danego SVL na oddziaływanie części prądu zwarciowego należy wykonać szczegółowe analizy rozplywu tego prądu i zamodelować rzeczywiste warunki pracy ogranicznika. Niemniej jednak parametr wytrzymałości zwarciowej może być wyłącznie definiowany dla czasów nieprzekraczających 0,2 s. Nie ma aktualnie środka technicznego, które mogłoby być zaproponowane dla czasów dłuższych, z tego względu jedynym możliwym rozwiązaniem może być zaproponowanie dodatkowej obudowy ogranicznika w wykonaniu przeciwwybuchowym, co jest, jak już wspomniano w poprzednich częściach rozprawy, dość często stosowanym rozwiązaniem.

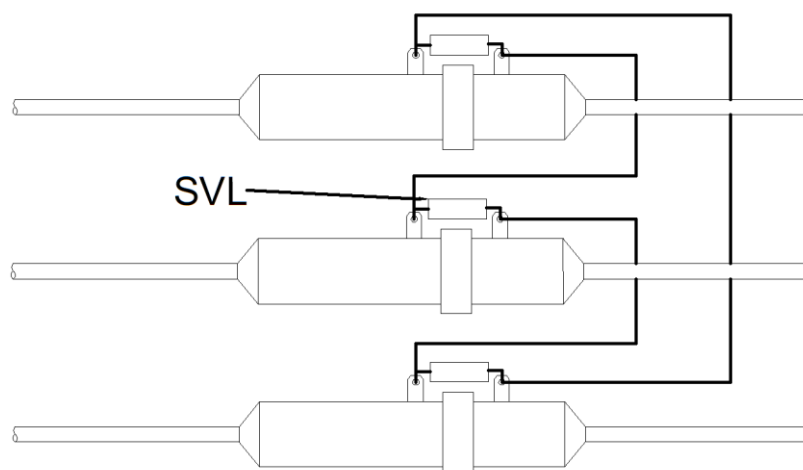
5.4. Sposoby łączenia i umiejscowienie SVL

Napięcie, jakie odkłada się na zaciskach SVL wynika z konfiguracji połączenia i schematu instalacji ograniczników w systemie kablowym [47, 168]. Stosuje się następujące sposoby połączenia SVL w liniach kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych dotyczy to głównie układów CB (w układzie SPB obowiązuje standardowy schemat połączenia SVL tj. jednofazowe z ziemią):

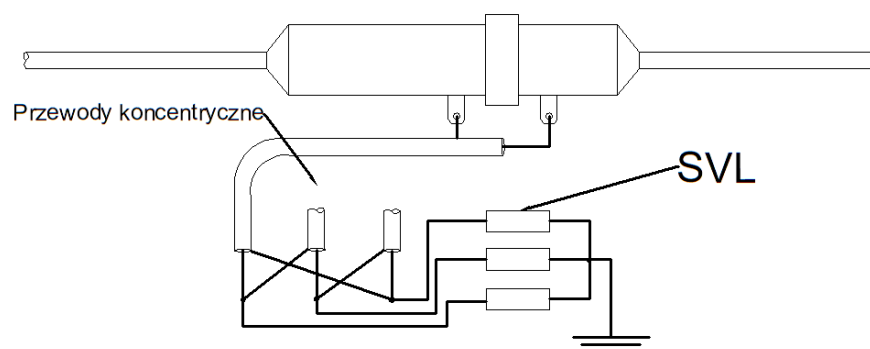
- umiejscowienie bezpośrednio na mufie CB – połączenie w układzie trójkątnym, przedstawione na rysunku 5.7,

- połączenie w układzie gwiazdy uziemionej (punkt gwiazdowy uziemiony bezpośrednio lub poprzez przewód ECC) zainstalowane w skrzynce CB, przedstawione na rysunku 5.8,
- połączenie w układzie gwiazdy nieziemionej zainstalowane w skrzynce CB,
- połączenie w układzie trójkątnym zainstalowane w skrzynce CB,
- umiejscowienie bezpośrednio na mufie CB – połączenie w układzie gwiazdowym, 2 szt. SVL na każdej mufie, których punkt połączenia jest uziemiony,

W przypadku instalacji bezpośrednio na mufie, w celu ochrony od warunków zewnętrznych, wykorzystuje się odpowiednio dobrane koszulki termokurczliwe.



Rys. 5.7. Najlepsze miejsce instalacji ograniczników przepięć wg [68]



Rys. 5.8. Zalecany sposób przyłączenia ograniczników przepięć wg [68]

Określenie liczby SVL i ich lokalizacja powinna być ustalona w wyniku analizy systemu kablowego pod kątem konfiguracji poszczególnych sekcji systemu kablowego i stanowi obszar podlegający optymalizacji w procesie projektowania. Proces ten uwzględnia koordynację rozwiązań technicznych

z parametrami samych SVL, aby zminimalizować ewentualne oddziaływanie przepięć dorywczych na pracę ograniczników redukując ryzyko ich uszkodzenia i zapewnić odpowiedni stopień ochrony od przepięć udarowych.

Ogólne wytyczne wymienione poniżej, zaczerpnięte z praktyki inżynierskiej autora oraz z publikacji [161], przedstawiające najnowsze dane międzynarodowe dotyczące eksploatacji systemów kablowych WN, mogą stanowić wsparcie w wyborze konkretnego rozwiązania technicznego do zastosowania w projektowanej linii kablowej:

- w celu uniknięcia narażenia osób postronnych na ewentualne zagrożenie spowodowane wybuchem SVL, należy wziąć pod uwagę instalację ograniczników na terenie niedostępnym np. terenie stacji elektroenergetycznej, lub bezpośrednio w gruncie (dla CB),
- w przypadku układów z zastosowanym uziemieniem jednostronnym pod względem ochrony od przepięć pochodzenia atmosferycznego preferuje się instalację ograniczników w miejscu występowania niższej wartości uziemienia,
- instalacja ograniczników w miejscu bardziej narażonym na wylądowania atmosferyczne (od strony linii napowietrznej w przypadku jej skablowania na pewnym odcinku, na przykład na podejściu do stacji elektroenergetycznej),
- instalować ograniczniki w miejscach i w taki sposób, aby umożliwić bezproblemową ich eksploatację, w tym sprawdzenie poprawności działania w sytuacji po wystąpieniu indukowanych przepięć dorywczych (jako wynik przepływu prądu zwarciovego w linii kablowej),
- w sytuacji wprowadzenia linii kablowej do rozdzielnic w wykonaniu GIS preferowane jest uziemienie ekranu metalicznego kabla od strony rozdzielnic GIS, z powodu występowania większej stromości udarów napięciowych jako skutek przepięć łączeniowych.

Niektóre z powyższych wytycznych wskazują przeciwstawne rekomendacje dotyczące instalowania ograniczników, stąd istnieje konieczność indywidualnej oceny wszystkich możliwych elementów technicznych i organizacyjnych dostosowanych do danego operatora sieci przed wyborem, który z nich zastosować.

6. Analiza przepięć

6.1. Koordynacja izolacji w systemach kablowych WN

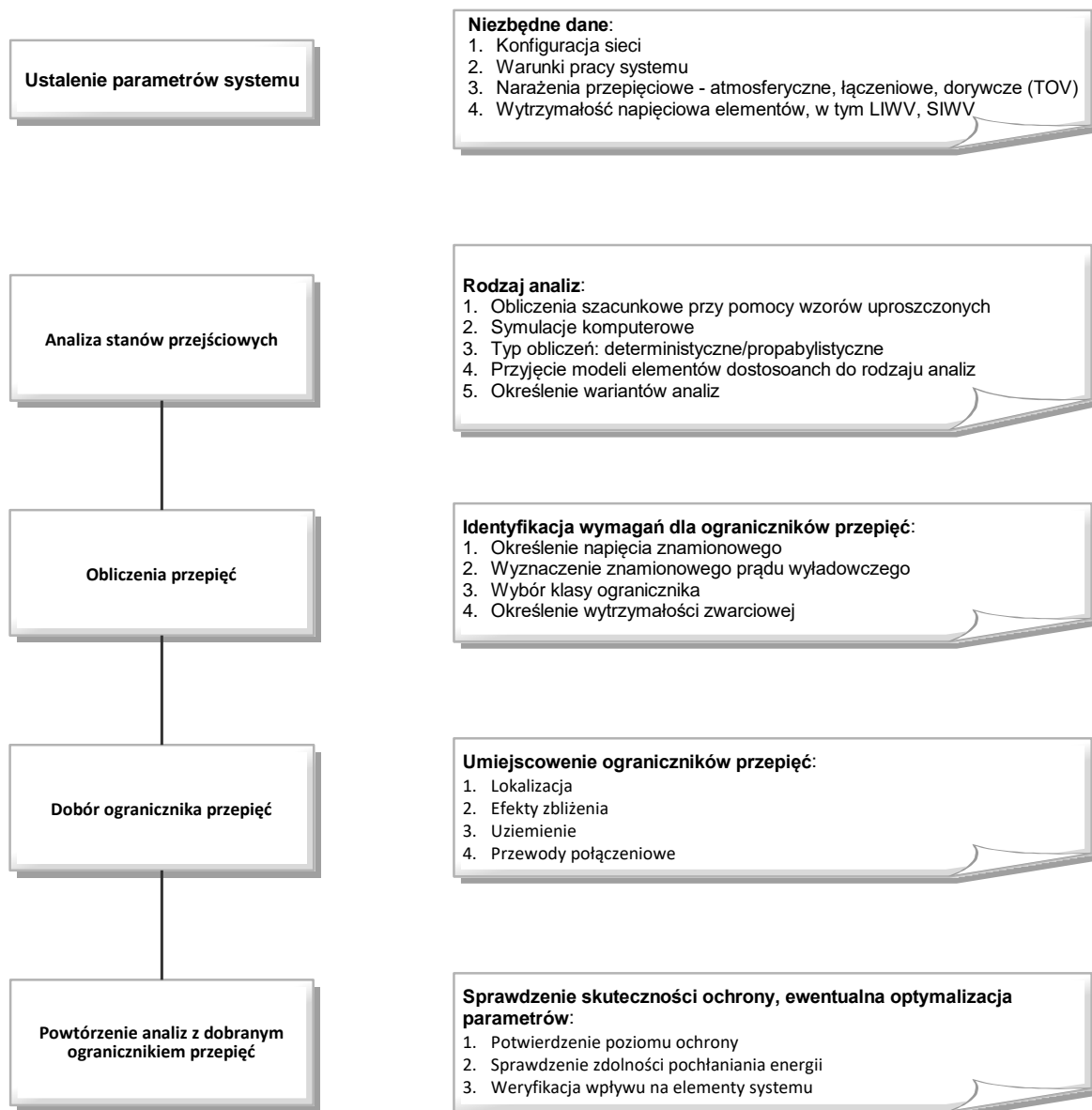
Generalną zasadą koordynacji izolacji jest określenie/oszacowanie narażeń napięciowych izolacji elementów analizowanego systemu, a następnie dobór odpowiedniego poziomu wytrzymałości napięciowej izolacji. Koordynacja izolacji jest terminem bardzo szerokim obejmującym wiele zagadnień, natomiast w niniejszej pracy dotyczy przede wszystkim zagadnień ograniczających się do analizy elementów ściśle związanych z rozwiązaniami technicznymi obejmującymi sposoby i metody uziemienia żył powrotnych linii kablowych wysokich napięć.

Narażenia napięciowe w systemach kablowych mogą być zredukowane poprzez instalację ograniczników przepięć, co jest standardowym, optymalnym ekonomicznie i podstawowym zabiegiem stosowanym powszechnie w projektach linii kablowych. Jako środki uzupełniające ochronę przez ograniczniki przepięć należy wziąć pod uwagę poprawę/obniżenie wartości uziemienia oraz dobór rodzaju i typu przewodów uziemiających i przewodów połączeniowych ekranów.

Linia kablowa z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych pod względem koordynacji izolacji obejmuje następujące elementy:

- powłoka (osłona zewnętrzna) kabla WN,
- przekładki izolacyjne muf kablowych oraz powłoka (osłona zewnętrzna) muf,
- przewody połączeniowe ekranów,
- skrzynki uziemiające / crossbondingowe (skrzynki łączeniowe) i ich wewnętrzne połączenia,
- przewody uziemiające,
- izolatory wsporcze płytki bazowej głowicy kablowej, kolnierze zacisków rozdzielnic w wykonaniu GIS

Proces związany z oszacowaniem narażeń napięciowych, określeniem parametrów izolacji elementów systemu oraz zastosowania ochrony przeciwprzepięciowej zawarty w normie [146], który uzupełniono o autorskie rekomendacje pozwalające na analizę rozwiązań alternatywnych w sytuacji, kiedy skuteczna ochrona od przepięć nie może zostać zapewniona przez wymagania sformułowane w tej normie, zaprezentowano na rysunku 6.1.



Zbadanie alternatyw

W przypadku braku możliwości zapewnienia koordynacji izolacji należy:

1. Dobrać urządzenia o wyższym poziomie BIL i BSL
2. Zmniejszyć odległość ogranicznika prądów od chronionego urządzenia/elementu
3. Zweryfikować możliwość równoległego połączenia ograniczników prądów
4. Dobrać ogranicznik prądów o lepszej charakterystyce ochronnej

Rys. 6.1. Procedura koordynacji izolacji na podstawie [146] uzupełniona o zalecenia autora

Źródłem narażeń napięciowych elementów systemu kablowego z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych są przebiegi atmosferyczne i łączeniowe pochodzące od strony zacisków/zakończenia linii kablowej (słup kablowy, rozdzielnica) oraz przebiegi dorywcze spowodowane przepływem prądów zwarciowych (wewnętrznych oraz występujących poza linią kablową). Amplituda przebiegów dorywczych, które są przebiegami o częstotliwości sieciowej, ma ograniczoną wartość i zależy od parametrów technicznych konfiguracji linii kablowej oraz wartości prądu zwarciowego przepływającego daną linią kablową. W zależności od rodzaju zwarcia

i parametrów elektrycznych obwodu zwarciovego, w pierwszym okresie mogą wystąpić dodatkowe oscylacje [91] o wyższych częstotliwościach i amplitudach, które zaprezentowano na wykresach zawartych w rozdziale 7 rozprawy, np. na rysunku 7.6 i 7.7.

W odróżnieniu od systemów elektroenergetycznych zestawianych z urządzeń i elementów z izolacją napowietrzną, gdzie wytrzymałość napięciową izolacji należy analizować w ujęciu statystycznym, w przypadku systemów kablowych mamy do czynienia z izolacją niesamoregenerującą się. Stąd należy przyjąć, że w przypadku wystąpienia przepięcia o amplitudzie wyższej niż wytrzymałość elektryczna izolacji, ulegnie ona uszkodzeniu.

Wg autora rozprawy pierwszym krokiem w procedurze koordynacji izolacji jest identyfikacja szczegółowych parametrów analizowanego systemu i warunków jego pracy. W systemach kablowych należy zwrócić szczególną uwagę na następujące dane, które powinny odpowiadać warunkom pracy możliwie zbliżonym do rzeczywistych:

- konfiguracja i lokalizacja w systemie elektroenergetycznym analizowanej linii kablowej,
- dane zwarciove m.in., poziom mocy zwarciovej i czas trwania/eliminacji zwarcia,
- parametry techniczne ułożenia,
- zastosowany sposób uziemienia żył powrotnych, w tym sposób ułożenia kabła ECC,
- rezystywność ziemi, rezystancje uziemień,

W przypadku wykonywania wstępnych analiz dokonuje się pewnych założeń i uogólnień, stąd istotnym jest wg autora, aby po weryfikacji szczegółów technicznych i otrzymaniu danych bardziej precyzyjnych odpowiadających rzeczywistemu obiektowi, wykonać ponownie cały zakres obliczeń w celu potwierdzenia poprawności doboru urządzeń.

Na diagramie przedstawionym na rysunku 6.1 podano alternatywne, zalecane przez autora pracy, rozwiązania w przypadku niespełnienia wymagań koordynacji izolacji. W odniesieniu do systemów kablowych dodatkową opcją proponowaną przez autora jest przekonfigurowanie systemu i zastosowanie innych rozwiązań pozwalających na zmniejszenie spodziewanych oddziaływań np. zastosowanie innego sposobu uziemienia żył powrotnych lub innego podziału poszczególnych sekcji na odcinki o mniejszych długościach.

W zależności od stopnia złożoności analizowanego systemu analizy przepięciowe w ramach obliczeń koordynacji izolacji mogą być mniej lub bardziej skomplikowane. Zazwyczaj przyjęte uproszczenia obliczeń powinny dawać wyniki zawierające dodatkowy margines bezpieczeństwa i powszechnie uznaje się je za konserwatywne, niemniej jednak, jak zostanie to wykazane w dalszych rozdziałach, w odniesieniu do systemów kablowych niekoniecznie jest to regułą. Stąd w sytuacji, kiedy wymaga się precyzyjnych wyników obliczeń, analizy złożonych systemów, czy też wyników analiz biorących pod uwagę elementy nieliniowe (np. skutek zadziałania ograniczników przepięć) autor zaleca przeprowadzenie symulacji komputerowych z pomocą oprogramowania do analizy elektromagnetycznych zjawisk przejściowych, co ma również swoje odzwierciedlenie w odpowiednich zapisach norm np. [146].

Analiza koordynacji izolacji zgodnie z broszurami technicznymi CIGRE dotyczącymi systemów kablowych [47, 89, 149, 161, 168, 180] powinna być przeprowadzona każdorazowo dla projektu linii kablowej z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, uwzględniając wszelkie aspekty wyspecyfikowane w normie [145].

Praktycznie od momentu pierwszego zastosowania specjalnego uziemienia żył powrotnych w liniach kablowych wysokich napięć projektowano i instalowano ograniczniki przepięć SVL w miejscu krzyżowania żył powrotnych układów CB oraz na nieuziemionym końcu ekranów metalicznych w układach SPB. Zastosowanie SVL z gruntu eliminuje konieczność zaawansowanych bardzo specjalistycznych analiz przepięć udarowych, natomiast niezbędnym jest wykonanie obliczeń i analiz przepięć dorywczych przede wszystkim w celu poprawnego doboru parametrów ograniczników przepięć. Dlatego zakres ewentualnych dodatkowych analiz przepięć udarowych zawierających wstępnie dobrane urządzenia (SVL) ogranicza się do następujących zagadnień:

- określenie dopuszczalnej długości przewodów połączeniowych ekranów oraz przewodów uziemiających,
- określenie wartości napięcia na przekładkach izolacyjnych muf separacyjnych,
- określenie konieczności instalacji dodatkowych iskierników w celu zmniejszenia narażeń przepięciowych,
- weryfikacja doboru klasy ogranicznika, tj. zdolności pochłaniania energii.

6.2. Analiza przepięć dorywczych

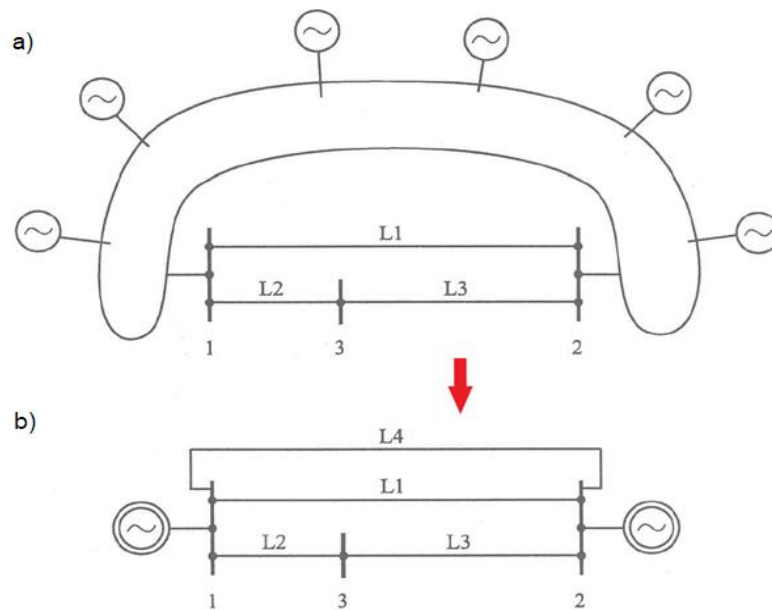
6.2.1. Rozpływy zwarciove - wyznaczenie wartości prądów i napięć

Przepięcia dorywcze w liniach kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych dotyczą gwałtownych, krótkotrwałych zmian napięcia, które wyindukuje się w ekranie metalicznym kabla w wyniku przepływu prądu zwarciovego żyłą roboczą. Na wartość napięć indukowanych, poza opisanymi w rozdziale 4 sposobami uziemienia ekranów metalicznych, ma wpływ przede wszystkim szczegółowy rozplw prądu zwarciovego. Dzięki indukcyjności wzajemnej oddziaływania od prądu płynącego w żyłce roboczej oraz udziału prądów płynących w ekranie/ekranach kabli lub w kablu ECC napięcia indukowane wzajemnie znoszą się i pozostałe napięcie indukowane wypadkowe jest znacznie mniejsze niż w przypadku braku analizy drogi powrotnej prądu zwarciovego [40, 44, 172, 173, 193, 194].

Aby określić, w jaki sposób prąd zwarciove rozplwa się w analizowanym systemie należy przeprowadzić stosowne obliczenia. Wytyczne i metody obliczeniowe w zakresie rozplwu prądu zwarciovego są bardzo gruntownie opisane w literaturze i normach [79, 80, 81, 82, 83, 91, 150, 177, 193], ale w praktyce zagadnienie to jest bardzo złożone. Największą trudność stanowi analiza rozplwu prądu zwarciovego w pobliżu początku i końca linii, tj. przy stacjach elektroenergetycznych [96, 112], w szczególności przy zastosowaniu uproszczeń i sprowadzeniu układu do układu jednofazowego.

Wielu autorów książek i publikacji omawiających zagadnienia rozplywu prądów zwarciovych nie wspomina o konieczności modelowania podsystemów zewnetrznych (ekwiwalentu sieci poza analizowanym systemem), które połączone ze sobą elektrycznie, w trakcie zwarcia, wpływają na prąd zwarcia. Aby uniknąć rozbudowanych analiz związanych z modelowaniem całego układu zamkniętego krajowej sieci elektroenergetycznej, można układ rzeczywisty sprowadzić do układu zastępczego o dwóch węzłach połączonych analizowanym odcinkiem linii [91, 193], co zaprezentowano na rysunku 6.2. Odpowiednie zastępcze admitancje można wyznaczyć z dostępnych rzeczywistych danych otrzymanych od operatora systemu przesyłowego.

Obliczenia rozplywowe i wyznaczenie udziałów oraz wartości prądów, a następnie napięć w analizowanym systemie wykonywane są w oparciu o odpowiedni model, w którym linia kablowa i otoczenie sieciowe reprezentowane są przez elementy o parametrach rozłożonych. Precyzyjne zamodelowanie badanego układu wraz z otoczeniem sieciowym, które może zawierać nawet kilka tysięcy elementów jest w przypadku wykonania obliczeń analitycznych trudne a czasami praktycznie niewykonalne. Z tego wzgledu opracowano metody uproszczone pozwalające na wykonanie wstępnych obliczeń przy założeniu pewnych warunków i dające wyniki przybliżone (niekoniecznie z marginesem bezpieczeństwa), bez konieczności iteracyjnego rozwiązywania równań nieliniowych, całkowania numerycznego czy stosowania rachunku operatorowego.



Rys. 6.2. Tworzenie ekwiwalentu zwarciovego systemu: a) przed redukcją podsystemu zewnetrzego, b) po zastąpieniu podsystemu zewnetrzego gałęzią L4 [91]

Pierwszą z tych metod jest sprowadzenie systemu do układu jednofazowego na przykład wg [80, 81, 82]. Drugą metodą jest wykorzystanie macierzowego modelu wielofazowego tzw. CIM (ang. *Complex Impedance Matrix*) opisanego w [1, 24, 47, 168]. Ostatnią możliwą do zastosowania metodą jest wykorzystanie modelowania komputerowego do symulacji

elektromagnetycznych stanów przejściowych przy wykorzystaniu oprogramowania typu EMTP. Na rysunku 6.3 zaprezentowano trzy wspomniane metody z krótką charakterystyką, które w szczegółach opisano w następujących podrozdziałach.

| Metoda | Wyszczególnienie | Sposoby obliczeń |
|---|--|---|
| Techniki komputerowe | <ul style="list-style-type: none"> Linia kablowa i otoczenie sieciowe reprezentowane są przez elementy o parametrach rozłożonych, rezystancje: żyły robocze, ekrany metaliczne, grunt indukcyjności (własne i wzajemne): żyły robocze, ekrany metaliczne pojemności: izolacja, ekrany niemetaliczne, otoczenie kabla obwód ziemnopowrotny reprezentowany przez ekwiwalent obliczony wg równań Carsona/Pollaczka | Oprogramowanie do symulacji elektromagnetycznych stanów przejściowych typu EMTP |
| <p>↓</p> <p><u>Założenia do uproszczenia modelu:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - pominięto wpływ pojemności układu - obliczenia wykonywane dla częstotliwości sieciowej 50 Hz - obwód ziemnopowrotny reprezentowany przez przewód ekwiwalentny | <p>Macierzowy model wielofazowy CIM</p> <ul style="list-style-type: none"> Macierzowy model wielofazowy opisujący system kablowy wraz ze wszystkimi równoległymi obwodami włącznie z obwodem ziemnopowrotnym Wyznaczone impedancje własne i wzajemne | Obliczenia numeryczne przy założeniu predefiniowanych warunków brzegowych |
| <p>↓</p> <p><u>Dalsze założenia upraszczające:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - znane (założone) wartości prądów w poszczególnych obwodach - symetryczne obciążenie wszystkich 3 faz w układzie normalnej pracy i zwarcia trójfazowym - brak obciążenia prądowego pozostałych obwodów poza fazowymi dla obciążenia normalnego, zwarcia dwufazowego oraz trójfazowego - przy zwarcu jednofazowym cały udział prądu zwarciovego przepływa kablem ECC dla układu SPB lub żyłami powrotnymi w układzie CB - układ CB idealnie zbalansowany | <p>Układ jednofazowy</p> <ul style="list-style-type: none"> Wzory uproszczone wyznaczone z macierzowego modelu wielofazowego z uwzględnieniem powyższych założeń | Wzory przedstawione w części 6.2.2 |

Rys. 6.3. Porównanie metod obliczeniowych wyznaczenia wartości napięć dorywczych wg [168]

6.2.2. Obliczenia z użyciem wzorów uproszczonych – model jednofazowy

Układ trójfazowy w stanach symetrycznych można opisać jako układ jednofazowy, ze względu na fakt, że schemat jest jednoliniowy, a zależności między napięciem i prądem są skalarne. W stanie

niesymetrycznym układzie trójfazowym dla każdego elementu analizowanego systemu należy brać pod uwagę wartości napięć i prądów trzech faz, a w zależnościach między tymi napięciami i prądami należy uwzględnić sprzężenia magnetyczne. To powoduje, że zależności między tymi napięciami i prądami są macierzowe, a odpowiadająca im macierz nie jest macierzą diagonalną [91]. Stąd obliczenia dla stanów niesymetrycznych mogą być złożone i wymagać dodatkowo zastosowania technik komputerowych.

Najbardziej stosowanym opisem układów trójfazowych w formie układu jednofazowego jest przekształcenie nazywane przekształceniem składowych symetrycznych, które jest powszechnie stosowane w analizach rozplywowych systemów elektroenergetycznych. Metoda może być wykorzystana do obliczeń napięć i prądów w systemach kablowych przy założeniu, że potencjał ekranów metalicznych wynosi zero. Niemniej jednak obliczenia pozwalają na najbardziej zrozumiałe odwzorowanie zachowania się analizowanego systemu.

Niezależnie od opisu układu wymagane jest uproszczenie polegające na pominięciu pojemności analizowanych elementów, dzięki czemu model zawiera wyłącznie impedancje wzdłużne.

Obwód ziemnopowrotny reprezentowany jest przez przewód ekwiwalentny, choć w wielu praktycznych sytuacjach, głównie w przypadku analizy krótkich odcinków linii kablowych, stanowi to bardzo duże przybliżenie [172]. Z powodu niewielkiego udziału prądu zwarciovego, który zamyka się przez ziemię, wyniki uznaje się za orientacyjne, ale też wystarczająco dokładne w większości praktycznych zastosowań [40, 168, 194].

Wprowadzając dodatkowe uproszczenia do układu, które wymieniono na diagramie przedstawionym na rysunku 6.3, możliwe jest wyprowadzenie równań, przy pomocy których można w prosty sposób obliczyć napięcia indukowane dla układów SPB oraz CB. Założenia upraszczające muszą umożliwiać analizę przypadków kluczowych biorąc pod uwagę wymiarowanie urządzeń, tj. otrzymywane wyniki powinny zawierać odpowiedni margines bezpieczeństwa i stanowić potencjalnie największe oddziaływanie.

Dla obciążeń roboczych analizowanego elementu systemu elektroenergetycznego, zwarcia dwufazowych i zwarcia trójfazowych zakłada się, że w pozostałych obwodach rozważanego układu prąd nie płynie. To oznacza, że prądy powłokowe w ekranach metalicznych oraz ewentualny prąd indukowany w kablu ECC lub innego równoległego do danej linii obwodu wynoszą zero [183].

Dodatkowo zakłada się, że prąd zwarcia jednofazowego w całości powraca kablem ECC w układach SPB, lub w przypadku układów CB drogę powrotną prądu stanowią żyły powrotne kabli. Rozplyw prądu zwarcia jednofazowego w rzeczywistych układach jest bardziej złożony, co opisano m.in. w [40] i zastosowano w obliczeniach wykonanych w niniejszej rozprawie, a zawartych w załącznikach A.1 oraz B.1. Te założenia powinny dawać wyniki napięć indukowanych minimalnie większe, tj. przy uwzględnieniu pewnego poziomu bezpieczeństwa, niż te, które wystąpią, jednak – jak wykaże autor rozprawy w rozdziale 7 – nie jest to regułą.

W dalszej części zaprezentowano najczęściej stosowane zależności do wyznaczania maksymalnej wartości napięcia trwałej pracy ogranicznika wg [35, 131] w zależności od układu

połączenia ekranów metalicznych. W broszurach technicznych CIGRE [47, 168], stanowiących podstawę wymienionych powyżej opracowań, zostało wyprowadzonych kilka dodatkowych zależności obejmujących większość typowych rozwiązań technicznych występujących w układach rzeczywistych, choć nie są to zależności obejmujące wszystkie możliwe konfiguracje linii kablowych. Dodatkowo, broszury te zawierają błędy, co opisano m.in. w [42, 172], czego przykładem jest zależność na wyznaczenie napięcia na ogranicznikach dla układu SPB z kablem ECC w równaniu (D6), w którym pierwszy człon równania pozbawiony jest znaku minus, stąd nie zaleca się bez weryfikacji wykorzystywania tych zależności do obliczeń i nie będą one przywołane w niniejszej rozprawie.

Wzory uproszczone dla dwóch najpowszechniejszych konfiguracji linii kablowych, tj. układu SPB (wzór 6.1) oraz SPB z kablem ECC (wzór 6.2), a także CB (wzór 6.3 i 6.4), zostały w obliczeniach zweryfikowane przez autora. Wzory przedstawiają zależności na wyznaczenie największych spodziewanych napięć na ogranicznikach – przy zwarciu jednofazowym w układzie SPB oraz zwarciu trójfazowym w układzie CB. Przy czym zakłada się w zależności opisującej układ CB, że linia z zastosowanym krzyżowaniem ekranów metalicznych jest linią łączącą dwie stacje elektroenergetyczne.

- Układ SPB przy założeniu rozplywu prądu zwarcia jednofazowego

$$U_c \geq |\underline{U}_i| = \left| \left\{ -j0,145 \lg \left(\frac{2S_{cf}}{d} \right) * \underline{I}_f - \left[R'_c + j0,145 \lg \left(\frac{S_{cf}}{\gamma_c} \right) \right] * \underline{I}_c \right\} * L \right| \quad (6.1)$$

- Układ SPB jw. przy założeniu, że cały prąd zakłócenia wraca kablem ECC

$$U_c \geq |\underline{U}_i| = \left| \left\{ - \left[R'_c + j0,145 \lg \left(\frac{2S_{cf}^2}{d\gamma_c} \right) \right] * \underline{I}_f \right\} * L \right| \quad (6.2)$$

gdzie:

I_f – prąd płynący w kablu fazowym linii WN przy zwarciu 1-fazowym poza kablem,

I_c – prąd płynący w kablu ECC przy zwarciu 1-fazowym poza kablem,

L – długość linii kablowej w km,

γ_c – geometryczny promień zastępczy żyły kabla ECC w m,

S_{cf} – średnia geometryczna odległość kabla fazowego dotkniętego zwarcie i kabla ECC w m,

d – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej w m,

R'_c – rezystancja jednostkowa żyły kabla ECC w Ω/km ,

U_i – napięcie zaindukowane na ograniczniku przepięć.

- Układ CB przy założeniu rozplywu prądu zwarcia trójfazowego – układ płaski

$$U_c \geq |\underline{U}_0| = \left| -j * I_{3f} * 0,145 \left(-\frac{1}{2} \lg \frac{S_{L1L2}}{d} \mp \frac{\sqrt{3}}{2} \lg \frac{4S_{L1L2}}{d} \right) * \frac{L}{3} \right| \quad (6.3)$$

- Układ CB przy założeniu rozplywu prądu zwarcia trójfazowego – układ trójkątny

$$U_c \geq |\underline{U}_0| = \left| I_{3f} * 0,145 \left(l_g \frac{2S}{d} \right) * \frac{L}{3} \right| \quad (6.4)$$

gdzie:

I_{3f} – prąd zwarcia trójfazowego,

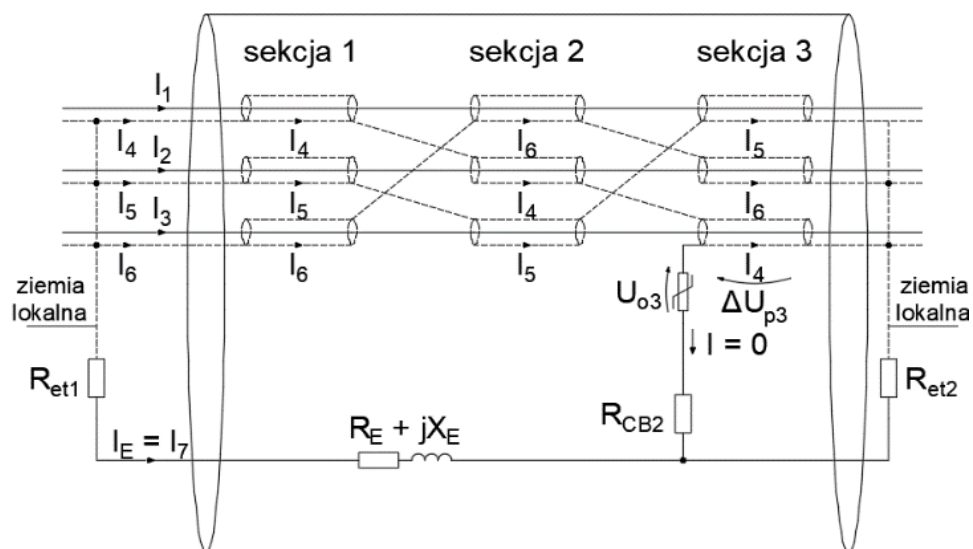
S_{L1L2} – odległość między osiami kabli faz L1 i L2 w układzie płaskim,

S – odległość między osiami kabli w układzie trójkątnym,

U_0 – napięcie zaindukowane na ograniczniku przepięć względem ziemi lokalnej.

6.2.3. Macierzowy Model Wielofazowy - CIM

Metoda obliczeń linii kablowych wykorzystująca Macierzowy Model Wielofazowy – CIM (ang. Complex Impedance Matrix) została opisana w broszurze CIGRE [168] i opiera się na reprezentacji linii kablowej jako zespołu przewodników (żyły robocze, żyły powrotne, ziemia równoważna, kabel ECC) zamkniętych w fikcyjnym cylindrze o określonych warunkach brzegowych. Prezentację graficzną fikcyjnego cylindra dla układu CB przedstawiono na rysunku 6.4. Pomijane są przy tym wszelkie pojemności istniejące w układzie, a obwód ziemnopowrotny jest odwzorowany przez równoważny przewodnik. W efekcie uzyskuje się zespół równań macierzowych określających relacje między prądami i napięciami w przewodnikach. Zaletą tej metody jest możliwość wykonania obliczeń dla różnych rodzajów zwarć, przy dowolnej geometrii ułożenia kabli, a także z wieloma torami czy opcjonalnym kablem ECC, co przedstawiono w artykule [33] oraz w załącznikach A.2 i B.2, zaś wadą – znaczne skomplikowanie równań, które ilustruje np. artykuł [1], w szczególności w układach CB, które wymagają modyfikacji oryginalnych równań pętli prądowych zawartych w [161]. Równania macierzowe rozwiązuje się numerycznie przy pomocy odpowiedniego oprogramowania, np. MATLAB[®] lub SMATH Studio.



Rys. 6.4. Schemat równoważny linii kablowej z krzyżowaniem żył powrotnych w metodzie CIM

Metoda CIM polega na wykorzystaniu praw Kirchoffa dla systemu kablowego złożonego z równoległych przewodników (żyły robocze, ekrany metaliczne, kable ECC, ekwiwalentny obwód ziemnopowrotny oraz inne równoległe obwody) objętych fikcyjnym cylindrem jako zestaw równań liniowych ujętych w następującą formę:

$$AX = B \quad (6.5)$$

gdzie: A – stanowi macierz impedancji układu i warunków brzegowych (np. uziemienie ekranów metalicznych), X – jest wektorem niewiadomych (napięć i prądów), B jest wektorem wiadomych (napięć i prądów). Rozwiązanie układu otrzymuje się przy pomocy macierzy odwrotnej A^{-1} .

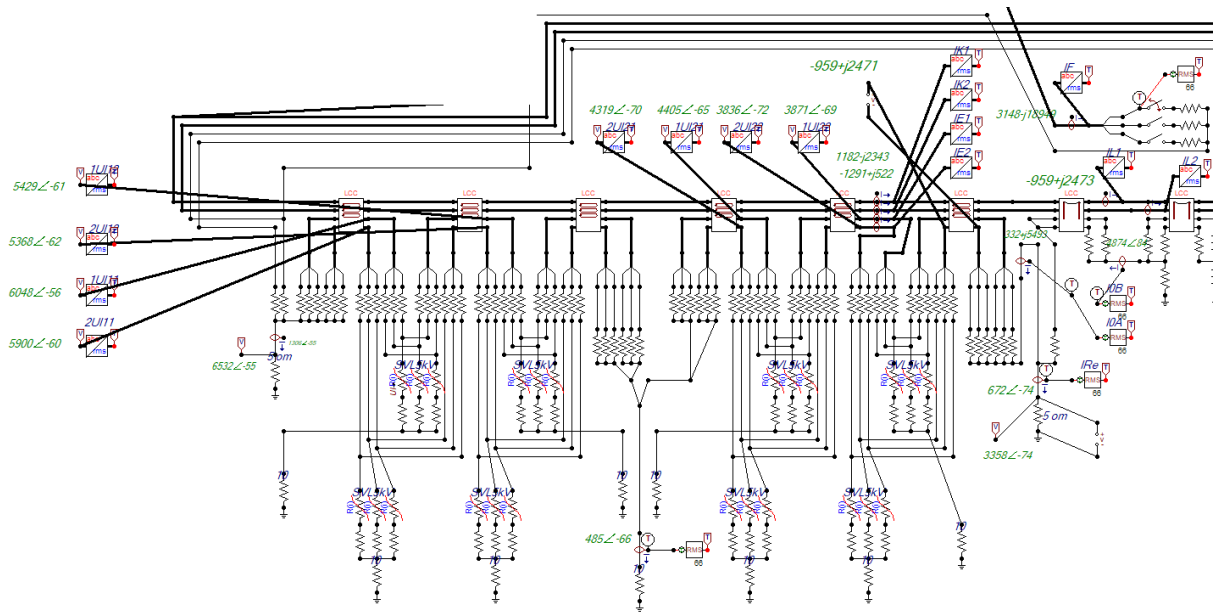
6.2.4. Symulacje komputerowe

Oprogramowanie typu EMTP daje możliwość kompleksowego modelowania systemów z uwzględnieniem wszystkich zależności pomiędzy elementami składowymi. Jest to szczegółowa, ale jednocześnie najbardziej skomplikowana reprezentacja rzeczywistych układów. Możliwe jest modelowanie nie tylko samej linii kablowej, ale również pozostałych elementów systemu elektroenergetycznego, takich jak stacje elektroenergetyczne i ich powiązania, transformatory, generatory, linie napowietrzne itd. W związku z czym, uzyskuje się wgląd w zjawiska powstające w różnych miejscach systemu, co umożliwi lepsze zrozumienie zależności i wzajemnego wpływu poszczególnych parametrów np. na wartości napięć indukowanych. Z drugiej jednak strony, uzyskanie wiarygodnych wyników wymaga wiedzy, doświadczenia i umiejętności w zakresie modelowania elektromagnetycznych stanów przejściowych, a przede wszystkim tworzenia odpowiednich modeli elementów badanej części systemu elektroenergetycznego w ramach konkretnej analizy.

Autor na potrzeby wykonania analiz obejmujących zagadnienia niniejszej rozprawy wykorzystał dwa pakiety oprogramowania. Pierwszym jest darmowy program wykorzystywany najczęściej w celach naukowych, tj. pakiet ATP-EMTP z modułem graficznym ATP-Draw. Drugim stanowi komercyjne oprogramowanie EMTP-RV. Choć należy do tej samej, rozwijanej od lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia rodziny programów EMTP (ang. *ElectroMagnetic Transient Program*), spośród innych aplikacji wyróżnia się przyjaznym graficznym interfejsem użytkownika oraz możliwością symulacji elektromagnetycznych i elektromechanicznych stanów przejściowych w systemach zawierających tysiące elementów, włączając w to układy sterowania (np. układy wzbudzenia generatorów), automatyki zabezpieczeniowej czy urządzenia energoelektroniczne (np. urządzenia FACTS). Bogata biblioteka elementów, zaawansowane metody obliczeniowe, możliwość inicjalizacji obliczeń w dziedzinie czasu ze stanu ustalonego czy funkcje automatycznej kontroli poprawności stworzonego układu oraz wykrywania niestabilności obliczeniowej gwarantują szybkość pracy oraz wiarygodne rezultaty. Program do wizualizacji przebiegów ScopeView, stanowiący część pakietu EMTP-RV umożliwia eksport i import danych w wielu formatach, w tym MATLAB® czy COMTRADE, oraz posiada zaawansowane funkcje matematyczne do analizy sygnałów. O jakości całego pakietu świadczy fakt wykorzystywania go przez światowych liderów i prekursorów w modelowaniu systemów elektroenergetycznych, operatorów systemów przesyłowych i spółki energetyczne m.in. w Kanadzie (Hydro-Québec,

Ontario Hydro) i Francji (RTE, EDF), a także przez wielu ekspertów działających w ramach CIGRE.

Podczas wykorzystania oprogramowania EMTP do analiz systemowych, pożądana jest wysoka dokładność obliczeń przy możliwie racjonalnym zaangażowaniu, bardzo często ograniczonych, zasobów komputerowych. Ponadto inżynierowie wykonujący tego typu analizy powinni korzystać z możliwie maksymalnie ograniczonych możliwości modelowania układów (przypisania konkretnego prawidłowego modelu elementu do danego typu analizy), w celu przede wszystkim koncentracji na analizie, którą wykonują, bez zbędnego zaangażowania w tajniki obsługi danego programu. Każdy program obliczeniowy bazujący na teorii obwodów wymaga do przeprowadzenia symulacji wprowadzenia konkretnych parametrów poszczególnych elementów obwodu. Z tych parametrów, niezbędne do przeprowadzenia obliczeń, są impedancje i admitancje analizowane jako parametry rozłożone, które definiują zachowanie się napięcia i prądu w analizowanej linii. Biorąc to pod uwagę w następnym podrozdziale 6.3 przedstawiono w szczególności wybór sposobu modelowania poszczególnych elementów systemu dla danej symulacji, aby przyjęte parametry poszczególnych elementów były prawidłowe. Na rysunku 6.5 zaprezentowano fragment zamodelowanej przez autora, w oprogramowaniu ATP-EMTP, linii kablowej, której szczegółową analizę przedstawiono w rozdziale 7 rozprawy.



Rys. 6.5. Fragment modelu dwutorowej linii kablowej wykonanej przez autora w oprogramowaniu ATP-EMTP, na potrzeby symulacji zawartych w rozdziale 7

Podczas, gdy możliwe jest oszacowanie wartości napięć indukowanych za pomocą metod uproszczonych opisanych w podrozdziałach 6.2.2 i 6.2.3, bardziej precyzyjne, ale też bardziej złożone, obliczenia są niezbędne, w celu dokładnego zamodelowania przepięć przejściowych wyindukowanych w ekranach metalicznych kabli, by w konsekwencji potwierdzić poziom ochrony oraz wyznaczyć ilość energii rozproszonej przez SVL w wyniku jego zadziałania. Biorąc pod uwagę

podejście uproszczone, konieczne jest założenie konserwatywnych współczynników bezpieczeństwa, aby poprawnie wyznaczyć parametry ograniczników SVL, co może w znacznym stopniu ograniczyć konfigurację układu, w jakim dana linia kablowa powinna zostać wykonana, co zmniejsza również skuteczność ochrony (przyjęcie wyższego poziomu napięcia trwałej pracy SVL). Z tego względu, głównie po to, aby zoptymalizować dobór poszczególnych elementów systemu przy zapewnieniu odpowiedniego poziomu ochrony, kluczowe jest wykonanie symulacji przy pomocy oprogramowania typu EMTP, które powinno umożliwiać analizę efektów zależnych od częstotliwości przy założeniu elementów nieliniowych symulowanego modelu.

Wykonując analizy rozprywowe z pomocą oprogramowania typu EMTP w celu uzyskania zbliżonych do rzeczywistych wyników przebiegu kształtu prądu udarowego, kluczowym jest odpowiednie zamodelowanie samego zwarcia, które nie powinno być reprezentowane wyłącznie przez łącznik zwierający fazę (lub fazy) z ziemią lokalną. Spowodowało by to, że czas narastania wartości prądu zwarcia wynikałby wyłącznie z przyjętego w warunkach symulacji przedziału czasu (ang. *time step*), co w wyniku powoduje nierealnie duże stromości narastania prądu, a w konsekwencji również napięć indukowanych. Jest wiele czynników, które wpływają na zmniejszenie stromości narastania prądu w warunkach rzeczywistych biorąc pod uwagę zwarcie w systemie. Są to m.in. lokalizacja miejsca zwarcia, jego charakter (przyczyna), indukcyjności siatki uziemiającej stacji ościennych zasilających zwarcie, nieliniowe rezystywności gruntu, jak również sam charakter łuku elektrycznego. Szczegóły sposobu podejścia do modelowania tego typu zjawisk opisano w następujących publikacjach [124, 158].

6.2.5. Wpływ składowej nieokresowej prądu zwarciego

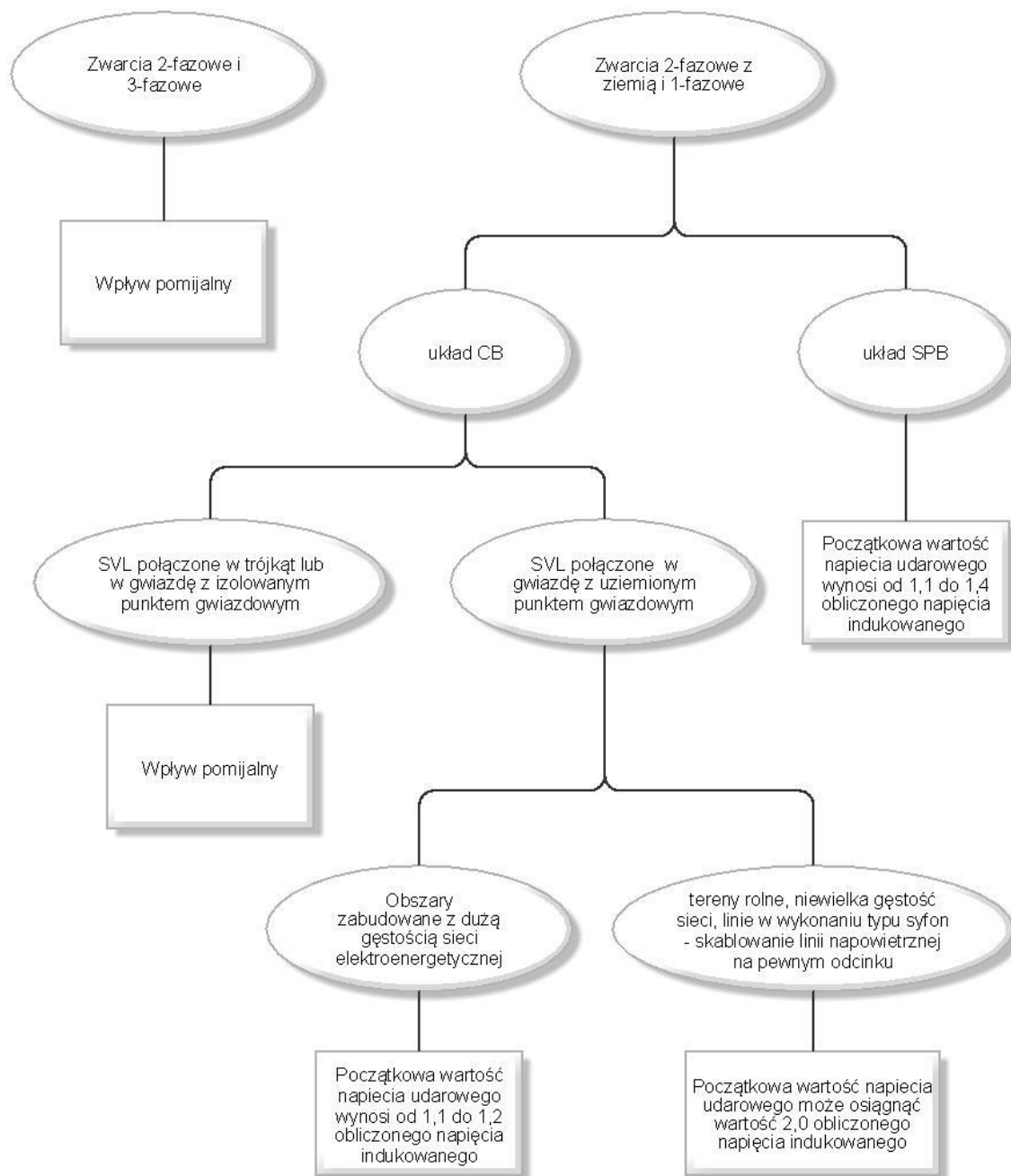
Wykorzystując do wyznaczenia wartości napięć indukowanych uproszczone metody obliczeniowe, czy też macierzowy model wielofazowy, otrzymywane wyniki przedstawiają wartości skuteczne pozwalające na odpowiednie dobranie parametrów napięcia trwałej pracy ogranicznika SVL. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że początkowa chwilowa wartość prądu zwarcia (udarowy prąd zwarcia), tym samym początkowa wartość indukowanego napięcia w ekranie metalicznym, z powodu wpływu składowej nieokresowej, w pierwszej chwili osiąga wartości większe niż wynika to ze stanu ustalonego. Jak powszechnie wiadomo, amplituda składowej nieokresowej prądu zwarciego (napięcia indukowanego) zależy od chwilowej wartości przebiegu napięcia w momencie wystąpienia zwarcia, a maksymalne wartości osiąga, gdy zwarcie nastąpiło w momencie przejścia napięcia przez zero. Stała czasowa składowej nieokresowej wynosi w systemach dystrybucyjnych 110 kV od 0.05 do 0.15 s [91]. Te dane należy wziąć pod uwagę w przypadku doboru parametrów ograniczników przepięć SVL. Ponadto należy zwrócić uwagę na niesymetrię napięcia indukowanego na zaciskach ogranicznika SVL (układ SPB) w stosunku do SEM wyindukowanej w ekranie metalicznym spowodowaną spadkiem napięcia w ekranie metalicznym oraz w kablu ECC [161, 172, 194], zwiększając negatywny wpływ składowej nieokresowej, co ilustruje zależność, która stanowi również podstawę wyznaczenia wzorów uproszczonych opisanych w podrozdziale 6.2.2:

$$\underline{U_i} = \underline{E_i} - \Delta \underline{U_c} \quad (6.6)$$

gdzie: E_i jest SEM wyindukowaną na żyłę powrotnej kabla, natomiast ΔU_c jest stratą napięcia na kablu ECC.

W przypadku braku możliwości dobrania parametru napięcia trwałej pracy ogranicznika SVL na spodziewane wartości napięć indukowanych, to należy w pierwszym stopniu przeanalizować zdolność pochłaniania energii, a tym samym klasę ogranicznika SVL. Klasa ogranicznika powinna być tak dobrana, aby biorąc pod uwagę wartość udarową napięcia indukowanego w ekranach metalicznych, jako wynik przepływu udarowego prądu zwarcia, ogranicznik w przypadku zadziałania nie przekroczył progu stabilności cieplnej. Do wyznaczenia początkowej wartości chwilowej napięcia indukowanego należy wykorzystać jako analogię metodologię wyznaczania wartości udarowego prądu zwarcia wg norm [79, 80].

Na rysunku 6.6 przedstawiono diagram podsumowujący wpływ składowej nieokresowej prądu zwarcia na wartość napięcia indukowanego na zaciskach ogranicznika SVL w zależności od konfiguracji układu i lokalizacji linii kablowej w systemie elektroenergetycznym wg [168], jako pewne wytyczne, które należy rozważyć analizując dany obiekt. W rozdziale 7, autor prezentuje szczegółowe wyniki analiz wpływu składowej nieokresowej prądu zwarcia na wartości napięć indukowanych i sposoby ich wyznaczania dla konkretnej linii kablowej objętej analizą.



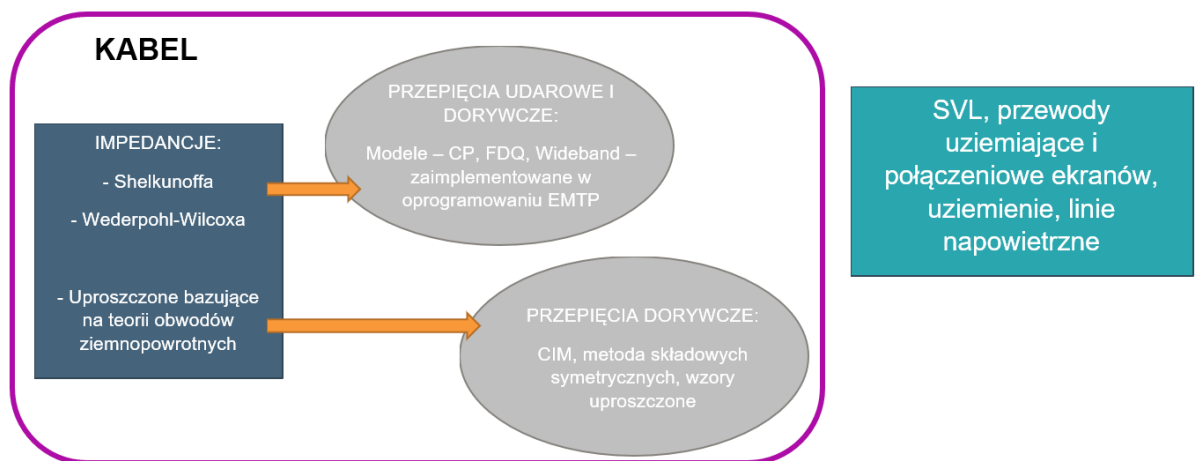
Rys. 6.6. Diagram podsumowujący wpływ składowej nieokresowej prądu zwarcia na wartość napięcia indukowanego na zaciskach ogranicznika SVL w zależności od konfiguracji układu wg [168]

Dla zwarć jednofazowych i dwufazowych z ziemią, składowa nieokresowa prądu zwarcia powoduje spadek napięcia na impedancji ekranów metalicznych, kablu ECC oraz instalacji uziemiającej, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia napięcia na zaciskach SVL. Obliczenia wpływu składowej nieokresowej wymagają bardzo szczegółowego modelu matematycznego analizowanego obwodu i jego otoczenia sieciowego w celu precyzyjnego określenia rozplywów prądów zwarciovych, stąd zaleca się wykorzystanie do obliczeń macierzowy model wielofazowy lub wykorzystanie oprogramowania EMTP w celu wykonania symulacji.

6.3. Autorska analiza optymalnego wyboru modeli elementów systemu kablowego do przeprowadzenia symulacji

6.3.1. Model kabla

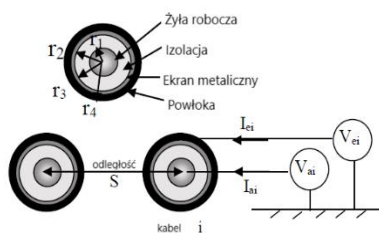
Celem niniejszej części rozprawy jest przedstawienie wytycznych konfiguracji modeli matematycznych poszczególnych elementów systemu kablowego, w celu wykonania analiz przepięciowych wg opisanych w podrozdziale 6.2 metod. Na rysunku 6.7 przedstawiono w sposób bardzo uproszczony zakres modeli przeanalizowanych w rozprawie elementów systemu kablowego.



Rys. 6.7. Modele elementów systemu kablowego w analizie przepięciowej

Najbardziej istotną i jednocześnie złożoną kwestię stanowi reprezentacja matematyczna impedancji i admitancji kabla / linii kablowej. Pierwsze próby modelowania kabli wykonano ponad 150 lat temu i opisano matematycznie jako równania telegrafistów, tj. równania linii długiej jako parę liniowych równań różniczkowych, opisujących zmiany zespolonej wartości napięcia i prądu w przebiegu linii długiej (względem jej długości i czasu). Równania opracował Olivier Heaviside [6, 8] jako rozwiązanie równań Maxwella dla linii kablowych w danym otoczeniu i stanowią one podstawę współczesnych modeli matematycznych wykorzystywanych w analizach stanów przejściowych jako obliczenia wykonywane przy pomocy metod komputerowych.

W przypadku przebiegów o częstotliwości sieciowej, jak już wspomniano w poprzednich rozdziałach, możliwe są pewne uproszczenia w zakresie reprezentacji matematycznej impedancji kabli. Gotowe formuły znajdują się w wielu publikacjach i standardach, m.in. w [6, 8, 14, 16, 24, 79, 88, 91, 97, 150, 168, 174, 177, 193, 194] i wykorzystywane są w celu wykonania analiz przy pomocy macierzowego modelu wielofazowego lub metody składowych symetrycznych, które są podstawą do wyznaczenia wzorów uproszczonych do obliczenia napięć indukowanych. Podsumowanie reprezentacji matematycznej linii kablowej dla metod uproszczonych (analiz o częstotliwości sieciowej) przedstawiono na rysunku 6.8.



$$\frac{\partial}{\partial \vec{z}} \begin{bmatrix} V_{ai} \\ V_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_a & z_m \\ z_m & z_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ai} \\ I_{ei} \end{bmatrix} + \sum_{i \neq j} \begin{bmatrix} z_{ij} & z_{ij} \\ z_{ij} & z_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aj} \\ I_{ej} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{z}} \begin{bmatrix} I_{ai} \\ I_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & -y_1 \\ -y_1 & y_1 + y_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ai} \\ V_{ei} \end{bmatrix}$$

Admitancje izolacji i powłoki kabla

$$y_1 = \frac{2\pi(g_2 + j\omega\epsilon_2)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_1}\right)} \quad y_2 = \frac{2\pi(g_4 + j\omega\epsilon_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}$$

Impedancja własna żyły roboczej
$$z_a = \frac{\omega\mu}{8} + R_a(1 + Y_s + Y_p) + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D}{r_1}\right) \right]$$

Impedancja własna ekranu metalicznego
$$z_e = \frac{\omega\mu}{8} + R_e + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_e}\right)$$

Impedancje wzajemne pomiędzy żyłą roboczą a ekranem metalicznym oraz pomiędzy pozostałymi kablami
$$z_m = \frac{\omega\mu}{8} + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_e}\right) \quad z_{ij} = \frac{\omega\mu}{8} + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d_{ij}}\right)$$

Rezystancje DC żyły roboczej oraz ekranu metalicznego
$$R_a = \frac{k_c}{\pi \cdot g_1 \cdot r_1^2} \quad R_e = \frac{1}{\pi \cdot g_3 \cdot (r_3^2 - r_2^2)}$$

Odstęłość przewodu od fikcyjnego przewodu powrotnego

γ : stała Bessela równa (1.7811)

$$D = \frac{2 \cdot e^{y/2}}{\gamma \sqrt{g_s \cdot \omega\mu}}$$

Współczynnik naskórkowości Y_s

Współczynnik zbliżenia dla układu trójfazowego Y_p

$$Y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot x_s^4} \quad x_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\pi R_a}} \cdot k_s$$

$$Y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} \left[0.312 \left(\frac{2J_1}{S} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} + 0.27} \right] \quad x_p = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\pi R_a}} \cdot k_p$$

Rys. 6.8. Reprezentacja matematyczna impedancji i admitancji kabla / linii kablowej dla analiz o częstotliwości o sieciowej na podstawie [24, 161]

Pierwsze modele matematyczne kabli wykorzystywane w oprogramowaniu typu EMTP, opierają się o wyniki prac prowadzonych przez Schelkunoffa dla impedancji własnych kabli jednożyłowych oraz na równaniach wyprowadzonych przez Pollaczka dla impedancji wzajemnych pomiędzy kablami a obwodem ziemnopowrotnym [36]. Równania Pollaczka, z powodu wykorzystania funkcji Bessela z argumentami zależnymi od częstotliwości, są bardzo złożone a próba znalezienia rozwiązania przy pomocy rachunku całkowego z zastosowaniem metod numerycznych prowadzi do niestabilności i uniemożliwia dojście do wyniku.

W celu rozwiązania powyższego problemu Wedepohl i Wilcox [17] wyprowadzili model matematyczny kabla zastępując funkcje Bessela poprzez funkcje hiperboliczne, ograniczyło to zastosowanie modelu w celu analizy zjawisk przejściowych do poziomu częstotliwości ok 100 kHz.

Powyższe modele zebrał, zweryfikował i uzupełnił prof. Ametani, który począwszy od lat 80 ubiegłego stulecia zaimplementował dotychczasowe modele matematyczne impedancji i admitancji kabli jednożyłowych oraz trójżyłowych do silnika oprogramowania ATP-EMTP jako procedurę CC (ang. *Cable Constants*), podsumowanie wraz z rysem historycznym tych prac zawiera artykuł [6].

Obliczenie impedancji i admitancji kabli o niestandardowej, skomplikowanej geometrii i konstrukcji nie jest możliwe przy zastosowaniu procedury CC. W takich przypadkach należy skorzystać na przykład z metody elementów skończonych do obliczenia parametrów danej linii kablowej, co zostało przedstawione w [8, 21, 139, 153], a następnie jako konkretne parametry wprowadzić do środowiska EMTP.

Impedancje i admitancje kabli obliczone w procedurze CC są następnie przez program typu EMTP procesowane w celu przeprowadzenia symulacji stanów przejściowych. Standardowo procedura CC przekształca dane fizyczne i geometryczne linii kablowej na parametry elektryczne (macierzowy model impedancji i admitancji) wg modelu Dommela oraz na model typu PI [3, 36, 37, 133] powszechnie oznaczane jako CP (ang. *Constant Parameters*). W modelach CP oprócz przewodników (żyła robocza, ekran metaliczny, pancierz) obliczane są również parametry otoczenia linii kablowej.

W przypadku wyboru standardowych modeli zależnych od częstotliwości, oznaczanych jako FD (ang. *Frequency Dependent*), tj. Semlyen, Marti i Noda, zaimplementowanych do środowiska ATP-EMTP procedura CC przekazuje obliczone parametry do dedykowanych danym modelom podprogramów, w których użytkownik uzupełnia pozostałe dane niezbędne do opracowania kompletnych modeli zależnych od częstotliwości.

Niestety pomimo wielu lat prac związanych z aktualizacją i walidacją powyższych modeli FD zależnych od częstotliwości, w oparciu o pomiary obiektów rzeczywistych, ich dokładność została potwierdzona wyłącznie w bardzo ograniczonym zakresie zastosowań [49, 50, 75, 114, 115, 116, 117, 129, 166]. Słabość tych modeli wynika z faktu, że macierz transformacji jest tworzona wyłącznie dla konkretnej wartości analizowanej częstotliwości badanych zjawisk, stąd w przypadku przebiegów stanów przejściowych przy zmiennych wartościach częstotliwości podstawowej, co ma miejsce zwłaszcza w przypadku przebiegów przepięć atmosferycznych i łączeniowych, dokładność odwzorowania odpowiedzi układu jest niewielka [184], a w niektórych przypadkach natrafiono również na problemy stabilności obliczeniowej, co w szczególności zaprezentowano w [75]. Według [161] modele FD nie powinny być stosowane do analiz przepięć dorywczych. Jednocześnie potwierdzono, że model linii kablowej typu PI o parametrach rozłożonych daje najbardziej poprawne i zbliżone do rzeczywistych wyniki symulacji dla przebiegów o częstotliwości sieciowej oraz poprawnie wyznacza odpowiedź napięciową układu w zakresie wartości amplitud przy przebiegach o wyższych częstotliwościach (choć bez odzwierciedlenia samego przebiegu wymuszenia), co ma kluczowe i wystarczające znaczenie w analizie koordynacji izolacji.

Biorąc pod uwagę fakt braku uniwersalnego modelu, który mógłby uzupełnić funkcjonalność modelu typu PI podjęto próby opracowania modelu, który mógłby znaleźć zastosowanie w możliwie najszerszym aspekcie analiz systemów kablowych. Takie modele począwszy od roku 2013 do dnia dzisiejszego stały się dostępne i opisano je w literaturze [63, 64, 65, 66, 67, 71, 101, 102, 139, 154, 166, 178], niemniej jednak zaimplementowano je wyłącznie w komercyjnych oprogramowaniach typu EMTP. Na potrzeby analiz niniejszej rozprawy wykorzystano uniwersalny model kabla zaimplementowany do środowiska EMTP-RV, tj. model szerokopasmowy WB (ang. *Wideband*) stworzony przez Octavio Ramos Leanos, który opisano w [102, 154]. Model ten został wielokrotnie sprawdzony, zweryfikowany i walidowany pomiarami na obiektach rzeczywistych, co znajduje odzwierciedlenie w najnowszej broszurze CIGRE [161], gdzie wskazuje się go, jako preferowany do wykonywania analiz systemów kablowych z wykorzystaniem oprogramowania typu EMTP na równi z innym uniwersalnym modelem oznaczonym jako FDQ (ang. *Full Frequency Domain Cable*). Do wprowadzenia parametrów linii kablowych, również modeli WB i FDQ, służy procedura CC.

Istotną kwestią biorąc pod uwagę modelowanie całej linii kablowej jest odpowiednia reprezentacja zastosowanego układu uziemienia żył powrotnych, które ma fundamentalne znaczenie dla obliczenia impedancji zerowej danej linii kablowej, niezbędnej w celu prawidłowego wyznaczenia nastaw zabezpieczeń [181].

W tabeli zaprezentowano podsumowanie cech poszczególnych modeli kabli (linii kablowych) na podstawie [24, 161].

Tabela 6.1. Porównanie modeli kabli wg [24, 161]

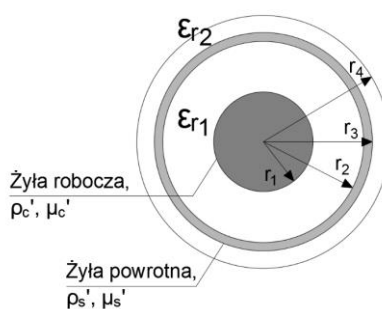
| Model kabla | Wyszczególnienie | Częstotliwość przebiegu | Zalety | Wady |
|-------------|--|--|---|--|
| CP | - parametry modelu typu PI obliczone dla konkretnej częstotliwości. - macierz przekształcenia liniowego o parametrach stałych dla liczb rzeczywistych | ustalona | prostota, transparentność danych i łatwa ich weryfikacja, krótki okres obliczeń, stabilność symulacji | obliczenia dla konkretnej częstotliwości, najlepsze odwzorowanie dla częstotliwości sieciowej, dla wyższych częstotliwości niedoszacowana tłumienność układu |
| FD | - parametry modelu typu PI zależne od częstotliwości. - macierz przekształcenia liniowego o parametrach stałych dla liczb rzeczywistych | powyżej 1 kHz | dokładność odwzorowania przebiegów lepsza niż CP | nie zalecane dla symulacji napięć indukowanych – przepięć dorywczych, gdzie odwzorowanie przebiegów częstotliwości sieciowej jest kluczowe |
| FDQ, WB | - parametry modelu typu PI zależne od częstotliwości. - macierz przekształcenia liniowego o parametrach zależnych od częstotliwości | całe spektrum od częstotliwości sieciowej do MHz | duża dokładność w całym przedziale częstotliwościowym | dla modelu FDQ długi czas obliczeń |

Podsumowując, w celu wykonania analizy przepięć w ramach procedury koordynacji izolacji dla linii kablowej z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, w celu podstawowego doboru parametrów urządzeń, możliwe jest zastosowanie zarówno modelu o parametrach rozłożonych typu PI, powszechnie oznaczanego jako CP (ang. *Constant Parameters*), jak i modelu uniwersalnego WB. W przypadku bardzo złożonych obliczeń stanów nieustalonych, chcąc analizować precyzyjnie przebiegi stanów przejściowych o zmiennych częstotliwościach, należy wykorzystać model szerokopasmowy. Więcej szczegółów w zakresie analizy przepięć udarowych zawarto w podrozdziale 6.4.

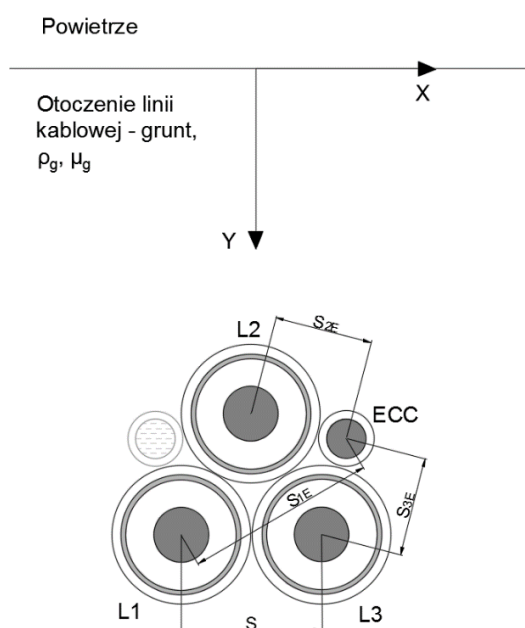
Procedura CC zaimplementowana w EMTP, ma pewne ograniczenia w możliwościach obliczenia parametrów elektrycznych linii kablowej na podstawie konfiguracji geometrycznej linii oraz wiernego oddania budowy kabla (stałych fizycznych użytych materiałów), co spowodowane jest mnogością dostępnych konstrukcji kabli będących w stałym ulepszeniu. Z tego względu wymagane jest przekształcenie rzeczywistych parametrów układu na takie, które należy wprowadzić do oprogramowania aby uzyskać możliwie jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych wartości parametrów elektrycznych.

Na rysunku 6.9 przedstawiono model reprezentatywny kabla jednożyłowego bez zbrojenia, wg którego program wylicza parametry elektryczne modelowanego kabla. Rysunek 6.10 przedstawia model linii kablowej. Procedura CC wymaga, aby użytkownik zdefiniował następujące dane i parametry:

- lokalizację każdego kabla w linii kablowej we współrzędnych x-y względem powierzchni ziemi;
- dane geometryczne każdego kabla reprezentujące jego budowę, z zastrzeżeniem, że stałe fizyczne poszczególnych warstw są skorygowane zgodnie z procedurą zaprezentowaną w dalszej części artykułu. Procedura ta wymaga od użytkownika decyzji w jaki sposób uwzględnić w niniejszym modelu parametry budowy żyły roboczej, poszczególne warstwy półprzewodzące oraz odwzorowanie ekranu metalicznego/żyły powrotnej;
- dane materiałowe:
 - rezystywność gruntu ρ_g oraz względną przenikalność magnetyczną μ_g ,
 - rezystywność żyły roboczej ρ_c' oraz względną przenikalność magnetyczną μ_c' ,
 - rezystywność ekranu ρ_s' oraz względną przenikalność magnetyczną μ_s' ,
 - przenikalność elektryczną izolacji ϵ_{r1} ,
 - przenikalność elektryczną powłoki/osłony kabla ϵ_{r2} ,
 - przenikalność magnetyczną dla poszczególnych warstw kabli bez zbrojenia przyjmuje się równą 1.0.



Rys. 6.9. Reprezentatywny model kabla wg procedury CC (Cable Constants)



Rys. 6.10. Przykładowe ułożenie linii kablowej wg procedury CC w układzie SPB

ŻYŁA ROBOCZA

Procedura CC wymaga aby żyła robocza zamodelowana została jako jednolity walec o promieniu podstawy r_1 oraz rezystywności ρ_c' w Ωm , natomiast w rzeczywistości najczęściej spotykamy się z budową żyły roboczej jako okrągłej wielodrutowej kompaktowej lub segmentowej. W celu zachowania długości promienia na żyłę roboczej równej promieniowi rzeczywistemu należy zwiększyć rezystywność materiału, z którego wykonano żyłę roboczą, aby zachować jednakową rezystancję jednostkową odcinka kablowego. Rezystywność wyznacza się z następującej zależności:

$$\rho_c' = R_{DC} \frac{\pi r_1^2}{l} \quad (6.7)$$

w której:

R_{DC} – Rezystancja żyły roboczej DC (przy 20 °C) w Ω/m odcinka kabla,

r_1 – promień na żyłę roboczej w m,

l – długość odcinka kabla wynosząca 1 m.

IZOLACJA WRAZ Z EKRANAMI PÓŁPRZEWODZĄCYMI

Warstwy (ekrany) półprzewodzące nie mogą być bezpośrednio zamodelowane w CC, z tego względu, aby odpowiednio zamodelować kabel przy uwzględnieniu warstw półprzewodzących należy:

- 1) obliczyć r_2 jako sumę: r_1 plus suma grubości obu warstw półprzewodzących plus grubość izolacji,
- 2) obliczyć przenikalność elektryczną izolacji jako:

$$\varepsilon_{r1} = \frac{C \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi\varepsilon_0} \quad (6.8)$$

gdzie:

C – pojemność kabla podana przez producenta w nF/m,

r_1 – promień na żyłę roboczej w m,

r_2 – promień na izolacji (uwzględniający warstwy półprzewodzące) w m,

ε_0 – $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m,

lub, w przypadku braku informacji o pojemności jednostkowej kabla:

$$\varepsilon_{r1} = \varepsilon \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(a/b)} \quad (6.9)$$

gdzie:

ε – wartość przenikalności elektrycznej izolacji podanej przez producenta,

a – promień wewnętrzny na izolacji, bez uwzględnienia warstwy półprzewodzącej,

b – promień zewnętrzny na izolacji, bez uwzględnienia warstwy półprzewodzącej.

Wymóg przekształcenia przenikalności elektrycznej izolacji wynika z konieczności zachowania wartości rzeczywistej pojemności kabla przy zmianie wymiarów geometrycznych izolacji kabla w środowisku EMTP.

ŻYŁA POWROTNA / EKRAN METALICZNY

Konstrukcja żyły powrotnej we współczesnych kablach wysokiego napięcia jest bardzo zróżnicowana, z tego względu najprostszym sposobem zamodelowania jest zastąpienie jej przez tubę o jednakowej rezystancji jednostkowej w stosunku do ekranu kabla rzeczywistego. To wymaga następujących zabiegów przekształceniowych w zakresie rezystywności materiału ekranu wykonanego z drutów miedzianych ρ_{Cu}' , a w przypadku zastosowania w budowie kabla również warstw ekranu z folii aluminiowej, obliczenia skorygowanej wartości rezystywności wypadkowej ekranu ρ_s' .

Specyfikacje współcześnie produkowanych kabli zawierają zazwyczaj informacje o szczegółowej budowie żyły powrotnej, niemniej w sytuacji braku tych danych, promień drutów miedzianych wchodzących w skład żyły powrotnej obliczamy z następującej zależności:

$$A_s = n\pi r_d^2 \Rightarrow r_d = \sqrt{\frac{A_s}{n\pi}} \quad (6.10)$$

gdzie:

r_d – promień drutu miedzianego wchodzącego w skład żyły powrotnej,

A_s – przekrój żyły powrotnej deklarowany przez producenta kabla w m²,

n – liczba drutów wchodzących w skład żyły powrotnej.

Następnie należy wyznaczyć skorygowaną wartość rezystywności żyły powrotnej w konstrukcji miedzianej ρ_{Cu}' zgodnie z poniższą zależnością:

$$\rho_{Cu}' = \rho_{Cu} \frac{\pi(r_w^2 - r_2^2)}{A_s} \quad (6.11)$$

$$r_w = r_2 + 2\sqrt{\left(\frac{A_s}{n\pi}\right)} \Leftrightarrow r_w = r_2 + 2r_d \quad (6.12)$$

gdzie:

ρ_{Cu} – rezystywność miedzi wynosząca $1.7241 \cdot 10^{-8} \Omega m$,

r_2 – promień na izolacji, uwzględniający warstwy półprzewodzące w m,

r_w – promień na żyłę powrotnej w m.

Folia aluminiowa mogłaby być zamodelowana jako niezależna warstwa, jednak procedura CC zaimplementowana w oprogramowaniu EMTP, uniemożliwia zamodelowanie więcej niż jednej warstwy ekranu metalicznego, przyjmując brak izolacji pomiędzy nimi (w konstrukcji kabla znajduje się warstwa półprzewodząca). Z tego względu wypadkowa grubość ekranu metalicznego obejmuje konstrukcję drutów miedzianych (pomija się w tym przypadku taśmę miedzianą, która również stanowi element konstrukcji żyły powrotnej obejmujący od 1% do 4% przekroju części miedzianej ekranu metalicznego) oraz folię aluminiową, której rezystywność ρ_{Al}' również należy skorygować. Następnie wyznacza się skorygowaną wartość rezystywności wypadkowej ekranu ρ_s' wg poniższej procedury:

$$A_{Cu} = \pi(r_w^2 - r_2^2) \quad (6.13)$$

$$A_{Al} = \pi(r_3^2 - r_w^2) \quad (6.14)$$

$$\rho_{Al}' = \rho_{Al} \frac{\pi(r_3^2 - r_w^2)}{A_s} \quad (6.15)$$

$$\rho_s' = \rho_{Cu}' \rho_{Al}' \frac{(A_{Cu} + A_{Al})}{\rho_{Cu}' A_{Al} + \rho_{Al}' A_{Cu}} \quad (6.16)$$

gdzie:

ρ_{Al} – rezystywność aluminium wynosząca $2.8264 \cdot 10^{-8} \Omega m$,

r_3 – promień na folii aluminiowej w m,

A_{Cu} – obliczony przekrój walca jako reprezentacji ekranu metalicznego w części miedzianej w m^2 ,

A_{Al} – obliczony przekrój walca jako reprezentacji folii aluminiowej w m^2 ,

Należy zaznaczyć, że powyższa procedura definiowania poszczególnych parametrów niezbędnych do modelowania linii kablowej wg procedury CC opiera się na danych otrzymanych od producenta kabla umieszczonych w specyfikacji technicznej. Norma [148] wymaga od producentów spełnienia tzw. minimalnych wymagań odnośnie grubości poszczególnych warstw, natomiast nie określa ich maksymalnych grubości. W związku z tym, producent w specyfikacji zakłada pewne nominalne dane. Natomiast kable wykonane są z tolerancją wynikającą z zastosowanej technologii budowy kabla i przewidujące efekty starzeniowe poszczególnych warstw. Rzeczywiste wymiary kabla mogą w pewnym stopniu różnić się od znamionowych, należy mieć to na uwadze w przypadku interpretacji wyników symulacji, czy analizie wybudowanych już obiektów.

W podrozdziałach 6.3.2., 6.3.3., 6.3.4 oraz 6.3.5., jako wynik dogłębnej autorskiej analizy, wskazano również sposoby modelowania pozostałych elementów systemu kablowego, tj. ograniczników przepięć SVL, przewodów uziemiających, przewodów połączeniowych ekranów, reprezentacji uziemień stacji oraz uziemień słupów linii napowietrznej, a także w przypadku skablowań linii napowietrznych - reprezentacji ich odcinków.

6.3.2. Model ogranicznika przepięć

Podobnie, jak ma to miejsce w przypadku kabli, każdy z modelowanych elementów, w tym także ogranicznik przepięć, wymaga innej reprezentacji matematycznej zależnej od zakresu częstotliwości badanych zjawisk. Nie opracowano jeszcze uniwersalnych modeli szerokopasmowych w zakresie częstotliwości wszystkich potencjalnych elementów systemu, stąd istnieje potrzeba dopasowania konkretnego modelu do danej symulacji. Tabela 6.2 opracowana na podstawie [145, 151, 179] zawiera podsumowanie najistotniejszych parametrów, które należy mieć na uwadze w przypadku wyboru modelu ogranicznika dostosowanego do analiz, które zamierza się przeprowadzić.

Tabela 6.2. Wytyczne doboru parametrów charakterystycznych dla modelu ogranicznika SVL w zależności od częstotliwości badanych stanów przejściowych na podstawie [145, 151, 179]

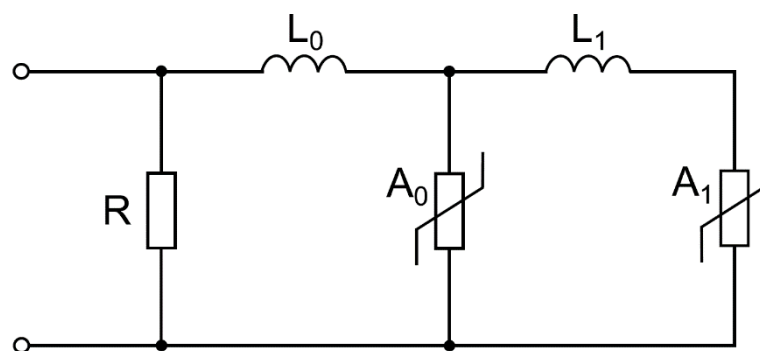
| Element / parametry | 0.1 Hz – 3 kHz | 50 Hz – 20 kHz | 10 kHz – 3 MHz | 100 kHz – 50 MHz |
|---|---|---|--|--|
| Ogranicznik przepięć | obwód o nieliniowej rezystancji, scharakteryzowany wartością napięcia obniżonego U _{res} (charakterystyka U-I) | obwód o nieliniowej rezystancji, scharakteryzowany wartością napięcia obniżonego U _{res} (charakterystyka U-I) | obwód o nieliniowej rezystancji, scharakteryzowany wartością napięcia obniżonego U _{res} (charakterystyka U-I) oraz kształtem udaru | obwód o nieliniowej rezystancji, scharakteryzowany wartością napięcia obniżonego U _{res} (charakterystyka U-I) oraz kształtem udaru |
| Charakterystyka U-I zależna od temperatury | czynnik istotny | pomijalny | pomijalny | pomijalny |
| Charakterystyka U-I zależna od częstotliwości | pomijalny | pomijalny | czynnik istotny | czynnik bardzo istotny |
| Indukcyjność warystora | pomijalny | pomijalny | czynnik istotny | czynnik bardzo istotny |
| Indukcyjność przewodów uziemiających | pomijalny | pomijalny | czynnik istotny | czynnik bardzo istotny |

Jak wynika z tabeli 6.2, podstawą modelowania ogranicznika przepięć jest charakterystyka U-I reprezentowana przez obwód zawierający nieliniową rezystancję. W przypadku podejścia do zaproponowanej przez autora, analizy przepięć dorywczych istotną kwestię stanowi wpływ temperatury warystora na kształt charakterystyki U-I. Natomiast biorąc pod uwagę analizy przepięć łączeniowych i atmosferycznych, należy wziąć pod uwagę zależność charakterystyki U-I od częstotliwości i kształt udaru napięciowego. Ponadto dla przebiegów szybkozmiennych indukcyjność warystora oraz przewodów uziemiających jest istotna i powinna być wzięta pod uwagę w procesie budowy/wyboru modelu matematycznego ogranicznika przepięć.

Jak już wspomniano w rozdziale 5 rozprawy, napięcie obniżone ogranicznika U_{res} (wartość szczytowa napięcia występującego na zaciskach ogranicznika podczas przepływu prądu

wyładowczego) wzrasta wraz ze zwiększeniem stromości czoła udaru. Biorąc ten fakt pod uwagę w przypadku przepięć o wysokich częstotliwościach model oparty wyłącznie o obwód z nieliniowym rezystorem nie może służyć reprezentacji zachowania się ogranicznika w tym zakresie częstotliwości. Ograniczniki przepięć zachowują się w różny sposób zależnie od kształtu fali napięciowej. Aby wiernie oddać zachowanie tego elementu w trakcie symulacji komputerowych opracowano kilka modeli zależnych od częstotliwości, które znajdują zastosowanie w analizie stanów przejściowych. Modele te różnią się sposobem skomplikowania, wprowadzania danych i samą reprezentacją pod względem obwodu zastępczego. Ze wszystkich dostępnych modeli, trzy zostały bardzo dokładnie przebadane i potwierdzono ich skuteczność w wykorzystaniu na potrzeby symulacji komputerowych, o czym świadczą bardzo liczne publikacje porównawcze wyników symulacji z danymi otrzymanymi doświadczalnie podczas badań wyrobu przez producentów [2, 13, 34, 46, 54, 56, 106, 107, 110, 120, 127, 136, 159], a są nimi: model stworzony przez grupę IEEE [125] oraz modele uproszczone bazujące na modelu IEEE: Fernandez-Diaz i Pinceti–Giannettoni [142]. Przeprowadzone analizy porównawcze potwierdziły dokładność odwzorowania pomierzonej podczas badań fizycznych maksymalnej wartości napięcia obniżonego przez przywołane modele matematyczne wynoszącą +10% napięcia obniżonego dla modelu IEEE oraz maksymalnie +6% w pozostałych dwóch modelach. Należy zaznaczyć, że model Pinceti–Giannettoni, wyróżnia się największą dokładnością, w wielu badanych układach odwzorowanie wartości napięcia obniżonego podawane było z dokładnością do +1%.

Pod względem wyboru konkretnego modelu ogranicznika należy przede wszystkim kierować się dostępnością danych niezbędnych do utworzenia modelu. Model IEEE bazuje na właściwościach fizycznych ogranicznika, które nie są powszechnie dostępne, dlatego w niniejszej pracy dla przebiegów szybkozmiennych zastosowano model opracowany przez Pincetiego i Giannettoniego, w którym parametry zastępcze obwodu oparte są na danych elektrycznych udostępnionych przez producentów ograniczników w kartach katalogowych. Dodatkowym atutem jest brak konieczności dodatkowego dostrajania parametrów, co jest konieczne w standardowym modelu IEEE. Na rysunku 6.11 przedstawiono schemat zastępczy modelu Pincetiego i Giannettoniego, wybranego w rozprawie przez autora, jako najodpowiedniejszego w celu przeprowadzenia proponowanego w rozprawie procesu analizy przepięć udarowych. Ponadto opisano procedurę wyznaczania poszczególnych parametrów tego modelu.



Rys. 6.11. Schemat elektryczny modelu ogranicznika przepięć opracowany przez Pincetiego i Giannettoniego wg [142]

Parametry warystorów (charakterystyki U-I) A_0 oraz A_1 wyznacza się na podstawie procedury opisanej w [125], przy pomocy następujących zależności:

$$A_0 = A_{w0} \frac{U_{r8/20}}{1.6} \quad (6.17)$$

$$A_1 = A_{w1} \frac{U_{r8/20}}{1.6} \quad (6.18)$$

gdzie:

$U_{r8/20}$ – wartość napięcia obniżonego dla udaru prądowego o wartości 10 kA o znormalizowanym kształcie 8/20 μ s,

A_{w0} , A_{w1} – zależności otrzymane z poniższych formuł:

$$A_{w0} = c_0 i_{A0}^{0.051} \quad (6.19)$$

$$A_{w1} = c_1 i_{A1}^{0.0507} \quad (6.20)$$

przy czym:

i_{A0} , i_{A1} – są wartościami gęstości prądów w gałęziach odpowiednio A_0 i A_1 ,

c_0 , c_1 – stałymi o wartościach: $c_0=1.378$, $c_1=1.083$.

Do wyznaczenia pozostałych parametrów modelu Pincetiego i Giannettoniego wg [142] służą następujące zależności:

$$L_1 = \frac{1}{4} \frac{U_{r1/T2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_r \quad (6.21)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \frac{U_{r1/T2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_r \quad (6.22)$$

gdzie:

R – rezystancja o wartości 1 M Ω wprowadzona w celu zapewnienia stabilności obliczeń numerycznych,

L_1 , L_0 – wartości indukcyjności wyliczone są w μ H,

U_r – wartość napięcia znamionowego ogranicznika w kV,

$U_{r1/T2}$ – wartość napięcia obniżonego dla udaru prądowego o wartości 10 kA o kształcie 1/T2 μ s w kV, gdzie czas opadania charakterystyki udaru T2 nie jest sprecyzowany ze względu na fakt, że producenci podają różne wartości czasu trwania (wielu producentów oznacza ten element jako „1/...” nie podając konkretnej wartości), nie stanowi to jednak wpływu na zachowanie się modelu pod względem numerycznym.

Model ogranicznika dostosowany do przebiegów wolnozmiennych, tj. o częstotliwości sieciowej jest rezystorem o nieliniowej rezystancji, z pominięciem członu zależnego od częstotliwości.

W celu określenia zdolności pochłaniania energii i wyznaczenia dla danego ogranicznika przepięć obszaru stabilności cieplnej, należy w środowisku EMTP utworzyć obwód pomiaru wartości składowej czynnej prądu płynącego przez ogranicznik, który bezpośrednio odpowiedzialny jest za straty energii w ograniczniku przepięć i wzrost temperatury warystorów [53, 106, 157, 160, 188, 189]. Jest to związane z faktem, że normy [146, 147] nie definiują w jednoznaczny sposób zdolności pochłaniania energii przez ograniczniki przepięć w odniesieniu do stabilności termicznej.

Z powodu bardzo dużej nieliniowości charakterystyki V-I ogranicznika, jedynie wartości chwilowe napięcia przyłożonego do zacisków ogranicznika oraz prądu, jaki ogranicznik przewodzi w danej chwili mogą być brane pod uwagę w przypadku wyznaczenia energii jaką ogranicznik może pochłonąć [169]. Stąd energię E traconą w ograniczniku przepięć należy obliczyć na podstawie następującej zależności:

$$E = \int_0^t u(t) * i(t) dt \quad (6.23)$$

gdzie $u(t)$ jest wartością napięcia obniżonego na zaciskach ogranicznika przepięć w chwili przepływu prądu $i(t)$.

Wzrost temperatury ΔT w $^{\circ}\text{C}$ w ograniczniku wyznacza się przy założeniu ciepła właściwego warystora wynoszącego $c_w = 0.55 \frac{\text{J}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$ zgodnie z [188], wg następującej zależności:

$$\Delta T = \frac{E}{m * c_w} \quad (6.24)$$

gdzie m – masa warystora w g.

Analiza przepięć w powłokach kabli przeprowadzana przy pomocy oprogramowania typu EMTP wymaga bardzo precyzyjnego zamodelowania każdej sekcji badanej linii kablowej. Niemniej jednak w przypadku modeli ograniczników przepięć pracujących jako SVL nie ma takiego wymogu i dla długich linii może być niepraktyczne. Wg opracowań CIGRE [88, 149, 161, 180] precyzyjne modele ograniczników przepięć, biorąc pod uwagę analizę zdolności pochłaniania energii przez SVL, tj. symulacje związane z załączeniem linii pod napięcie oraz w przypadku zwarcń mających miejsce poza linią kablową, powodujących wyindukowanie się napięć w ekranach metalicznych, powinny być zastosowane na obu końcach linii kablowej podlegającej analizie [190, 191]. Rekomendowane jest, aby zastosować modele SVL w dwóch początkowych oraz dwóch końcowych sekcjach linii kablowych w przypadku układu CB [161], w których można założyć najgroźniejszy przypadek wystąpienia zwarcia bezpośrednio po załączeniu linii pod napięcie, uwzględniając zdolność pochłaniania energii przez ograniczniki przepięć SVL.

6.3.3. Model linii napowietrznej

Tabela 6.3 opracowana na podstawie [151, 179, 184] zawiera podsumowanie najistotniejszych parametrów, które należy mieć na uwadze w przypadku definiowania modelu linii napowietrznej dostosowanego do danego typu analizy.

Tabela 6.3. Wytyczne doboru parametrów modelu linii napowietrznej w zależności od częstotliwości badanych stanów przejściowych na podstawie [151, 179, 184]

| Element / parametry | 0.1 Hz – 3 kHz | 50 Hz – 20 kHz | 10 kHz – 3 MHz | 100 kHz – 50 MHz |
|-------------------------------------|--|--|---|--|
| Linia napowietrzna transponowana | model wielofazowy typu PI o parametrach skupionych | model wielofazowy typu PI o parametrach rozłożonych | model wielofazowy lub jednofazowy typu PI o parametrach rozłożonych | model jednofazowy typu PI o parametrach rozłożonych |
| Linia nietransponowana (asymetria) | czynnik istotny | asymetria pojemnościowa i indukcyjna – czynnik istotny | istotny, pomijalny dla analiz jednofazowych | pomijalny |
| Parametry zależne do częstotliwości | czynnik istotny | czynnik istotny | czynnik istotny | czynnik istotny |
| Model konstrukcji słupa | pomijalny | pomijalny | czynnik bardzo istotny | czynnik istotny – zależny od przeprowadzanych analiz |
| Uziemienie słupa | pomijalny | pomijalny | czynnik bardzo istotny | czynnik bardzo istotny |
| Parametry izolatorów | pomijalny | pomijalny | czynnik istotny | czynnik bardzo istotny |

Wykonując analizy przepięć dorywczych, najistotniejszą kwestię stanowi precyzyjne wyznaczenie rozplywu prądów zwarciovych w badanym fragmencie systemu elektroenergetycznego, którego częścią jest linia kablowa z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Sposób modelowania linii napowietrznej stanowiącej element badanego systemu zależy od tego czy dana linia stanowi część linii przesyłowej wykonanej jako napowietrzno-kablowa, czy też jest odrębnym elementem np. łączącym dwie stacje elektroenergetyczne. Gdy mamy do czynienia z linią napowietrzną niepowiązaną bezpośrednio z linią kablową, reprezentację stanowi model wielofazowy typu PI o parametrach skupionych, biorący pod uwagę ewentualną niesymetrię geometryczną układu przewodów, w przypadku jej występowania. W sytuacji, gdy mamy do czynienia z linią kablowo-napowietrzną, droga rozplywu prądu zwarcia obejmuje przewody odgromowe, konstrukcję słupa, uziemienie oraz obwód ziemnowprotny. W każdym przęśle linii napowietrznej dochodzi do zaindukowania się siły elektromotorycznej wynikającej ze sprzężeń magnetycznych i pojemnościowych przewodów fazowych i przewodu odgromowego, co powoduje wyodrębnienie w każdym przęśle linii obwodu ziemnowprotnego mającego wpływ na zmniejszenie dla linii z jednym przewodem odgromowym wartości impedancji składowej zerowej o ok 25% (w przypadku linii z dwoma przewodami odgromowymi wartość impedancji składowej zerowej ulega zmniejszeniu o ok 35%) [91], ma to bardzo duży wpływ na schemat rozplywu prądu zwarciovego, tj. na wartość prądu wyindukowanego w gałęziach obwodu zwarciovego (z pominięciem ziemi) [40, 193, 194]. Efekt ten charakteryzowany jest poprzez współczynnik redukcyjny linii (odrębnie definiowany dla linii kablowej oraz linii napowietrznej), który określa jaka część prądu zwarciovego łącznie przedostaje się do ziemi przez układ uziemiający. Dostępne w literaturze opisy wyznaczenia współczynnika redukcyjnego nie opisują

jednak sposobów wyznaczenia jego wartości dla linii kablowo-napowietrznych, również uwzględniając specyfikę specjalnego uziemienia żył powrotnych, np. przy zastosowaniu układu CB. Ma to szczególne znaczenie w analizie linii kablowych realizowanych jako wstawki w linii napowietrzne, tj. przy rozwiązaniach typu „syfon”. W tych szczególnych przypadkach konieczne jest wyprowadzenie zależności umożliwiających wyznaczenie współczynników redukcyjnych indywidualnie dla danego obiektu. Autor rozprawy w załącznikach A.1. oraz B.1. przeprowadził autorski proces obliczeniowy uwzględniający m.in. wyznaczenie współczynników redukcyjnych dla linii kablowych realizowanych, jako wstawki w linii napowietrzne.

Dodatkowym elementem modelu linii napowietrznej wymagającym sprecyzowania jest impedancja drogi powrotnej prądu zwarciovego widziana od strony miejsca zwarcia. W tym przypadku mamy do czynienia z układem drabinkowym, zawierającym impedancje własne przewodu odgromowego oraz rezystancje uziemienia poszczególnych stanowisk słupów. Impedancja wejściowa odcinka linii długiej (obejmującej przynajmniej 10 pręseł linii) zgodnie z [82, 177, 194] wyraża się następującą zależnością:

$$Z_{\infty} = \frac{1}{2} [Z_s + \sqrt{Z_s(Z_s + 4R_{ET})}] \quad (6.25)$$

w której Z_s jest impedancją własną przewodu odgromowego w danym pręśle, a R_{ET} jest średnią rezystancją uziemienia słupów. W przypadku linii realizowanych jako skablowanie odcinka linii napowietrznych wypadkowa impedancja powinna być wyznaczona również biorąc pod uwagę sposób uziemienia linii kablowej.

Analizy przepięciowe w zakresie wyładowań atmosferycznych wymagają bardziej złożonych modeli reprezentujących odcinek linii napowietrznej, obejmujących opis matematyczny impedancji uziemienia słupów, parametry izolacji, szczegółowe wymiary przestrzenne konstrukcji oraz szczegółowe parametry fizyczne przewodów roboczych i odgromowych. Należy jednak zaznaczyć, że tak szczegółowa reprezentacja powinna być zastosowana wyłącznie dla kilku pręseł linii napowietrznej widzianych w obu kierunkach z miejsca dotkniętego wyładowaniem zgodnie z [151]. Biorąc pod uwagę fakt, że wyładowanie atmosferyczne charakteryzuje się przebiegiem o wysokiej częstotliwości, jako model linii napowietrznej należy zastosować model wielofazowy o parametrach rozłożonych obejmujący ewentualną niesymetrię modelowanego układu przewodów dla każdego z pręseł indywidualnie. Duża staranność powinna być zachowana w przypadku modelu słupa kablowego ze względu na konieczność precyzyjnego zamodelowania układu ochrony przepięciowej (ograniczniki przepięć, przewody uziemiające), aby precyzyjnie określić ewentualne oddziaływania na te elementy.

Podobnie, jak w przypadku linii kablowych, również w odniesieniu do budowy modelu linii napowietrznej w oprogramowaniu EMTP opracowana jest dedykowana procedura oznaczona jako LC (ang. *Line Constants*), w której rzeczywiste parametry fizyczne (materiałowe oraz geometryczne) przeliczane są na parametry elektryczne, których reprezentacja zależna jest od wyboru konkretnego modelu (wielofazowego o parametrach skupionych / rozłożonych).

6.3.4. Model uziemienia

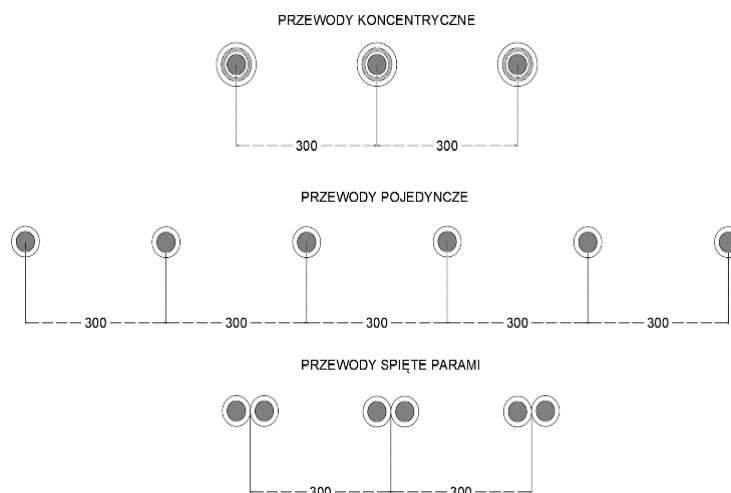
W przypadku przebiegów o częstotliwości sieciowej, impedancja gruntu zgodnie z [151, 179] może być reprezentowana jako rezystancja w postaci elementu skupionego. Dla przebiegów wyższych częstotliwości należy również ująć w modelu parametry zależne od częstotliwości oraz indukcyjności szczytkowe w połączeniach uziemiających powodujące dodatkowe spadki napięć przy przepływie prądów udarowych. Z drugiej strony ewentualna jonizacja gruntu oraz pojemnościowe prądy przesunięcia (wpływ dla gruntów o rezystywności wyższej niż $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$) są czynnikiem zmniejszającym wypadkową impedancję uziemienia.

W momencie przepływu prądu zwarciovego, czy też udarowego (wyladowanie atmosferyczne) przez rezystancję uziemienia następuje wzrost lokalnego potencjału ziemi EPR (ang. *Earth Potential Rise*). Wartość potencjału zmniejsza się w oddaleniu od miejsca lokalizacji uziemienia. EPR, jak już wspomniano w rozdziale 4 rozprawy może być zagrożeniem dla prawidłowej pracy ograniczników przepięć, osłon zewnętrznych kabli oraz elementów muf i głowic kablowych, stąd obliczenie wartości EPR jest istotne w celu prawidłowego doboru urządzeń i konfiguracji systemu kablowego [10, 47, 48, 140].

6.3.5. Model przewodów połączeniowych ekranów i przewodów uziemiających

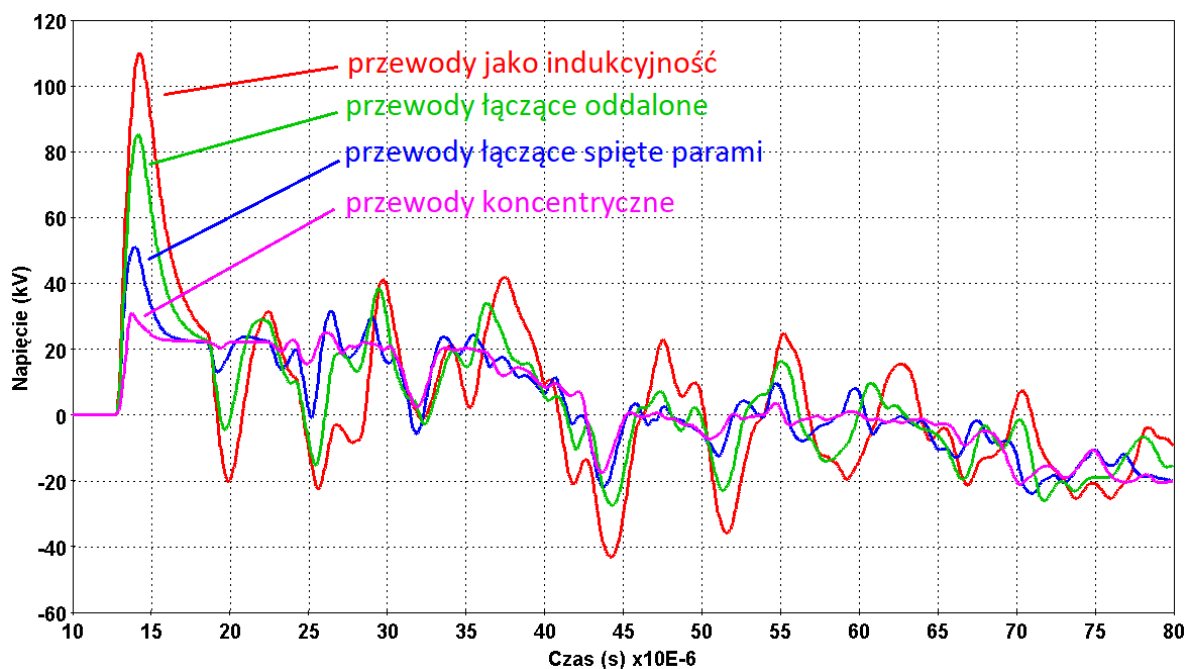
Przewody połączeniowe ekranów służą do łączenia ekranów metalicznych w skrzynkach CB do ograniczników przepięć SVL lub skrzynkach UZ poprzez przewody uziemiające do uziemienia. W analizach przepięć dorywczych, tj. o częstotliwości sieciowej, z tego względu, że są to relatywnie krótkie odcinki to mogą być one pominięte [161]. Natomiast w analizie przepięć atmosferycznych i łączeniowych sposób wykonania oraz zamodelowania tego połączenia ma duży wpływ na wartość szczytową napięcia na przekładkach izolacyjnych muf przy przepięciach (zwłaszcza atmosferycznych), które charakteryzują się stromym czolem (znaczna wartość di/dt), a więc generują duże spadki napięć na indukcyjnościach. Wg [168] przewody do ograniczników przepięć SVL mogą być reprezentowane przez indukcyjność, jednak podawane w literaturze wartości mają bardzo szeroki zakres (od $0,1 \mu\text{H}/\text{m}$ do $1,2 \mu\text{H}/\text{m}$), a wynikają z odrębnego podejścia do modelowania przewodów pod względem geometrycznym. Dlatego sugerowanym przez autora sposobem jest wykorzystanie modelu szerokopasmowego WB lub modelu FDQ, jako odzwierciedlenie parametrów fizycznych i geometrycznych przewodów w analizowanych układach, w formie parametrów rozłożonych zależnych od częstotliwości by możliwie najwierniej oddać wynikowe parametry elektryczne tych połączeń, a mogą być one następujące, co pokazano na rysunku 6.12:

- model szerokopasmowy WB lub FDQ linii z przewodami spiętymi parami,
- model szerokopasmowy WB lub FDQ linii z przewodami pojedynczymi oddalonymi,
- model szerokopasmowy WB lub FDQ linii z przewodami koncentrycznymi.



Rys. 6.12. Sposoby realizacji połączenia między mufami separacyjnymi a ogranicznikami przepięć [173]

Uściślając powyższe, należy dodać, że żaden z podanych sposobów nie reprezentuje w pełni owego połączenia, m.in. ze względu na zmienną orientację przestrzenną przewodów w rzeczywistych układach. Można jednak założyć, że użycie modelu szerokopasmowego lub FDQ, tj. modelowanie tego połączenia jako krótkich odcinków ułożonych na niewielkiej głębokości w ziemi, stanowi dobre przybliżenie układu rzeczywistego. Niemniej jednak sposób wykonania połączenia ma duże znaczenie na przebieg napięcia, co przedstawił autor rozprawy w artykule [173], a na rysunku 6.13 zaprezentowano przebiegi porównawcze.



Rys.6.13. Przebiegi napięcia na przekładkach izolacyjnych w miejscu krzyżowania żył powrotnych dla różnych typów kabli połączenia między mufami a ogranicznikami przepięć [173]

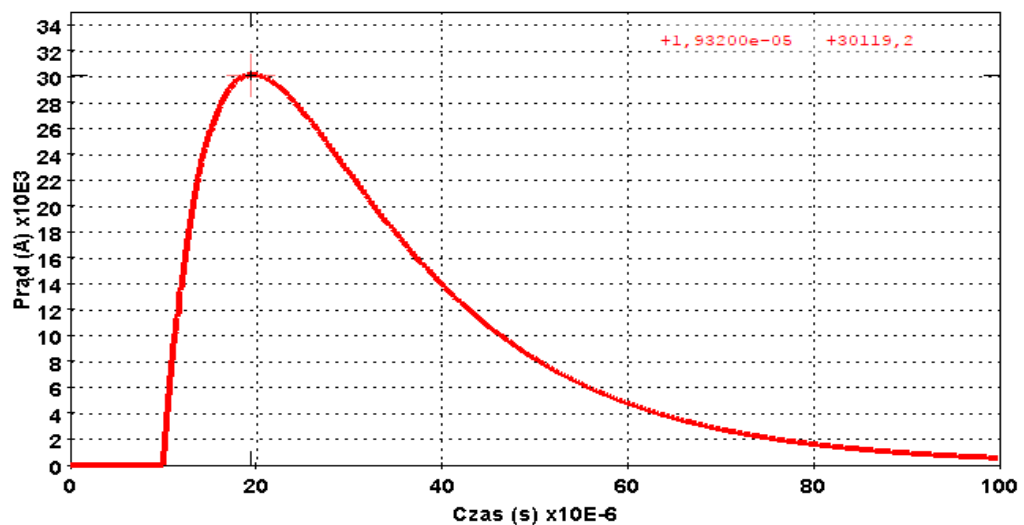
6.4. Analiza przepięć udarowych

Narażenia napięciowe spowodowane przepięciami łączeniowymi wynikają z samego modelu badanego układu, co zaprezentowano m.in. w [94, 134, 165] i symulacji włączenia linii pod napięcie, ewentualnie wyłączenia napięcia i zbadania odpowiedzi napięciowej badanego systemu, przy założeniu poprawności doboru poszczególnych modeli elementów względem parametrów zależnych od częstotliwości. Przepięcia łączeniowe mogą stanowić problem przede wszystkim w przypadku tzw. linii długich, tj. wg [63, 65, 88, 92, 118, 149, 180] rozumiane jako linie kablowe wysokiego napięcia o długości powyżej 20 km.

Natomiast w przypadku przepięć atmosferycznych, konieczne jest zamodelowanie samego wyladowania [105]. Model wyladowania piorunowego składa się z dwóch elementów – źródła prądowego i przyłączonej równolegle rezystancji reprezentującej drogę upływu prądu piorunowego pomiędzy chmurami i ziemią. Standardowo dla sieci dystrybucyjnej 110 kV model zakłada szczytową wartość prądu równą 30 kA oraz czas trwania czola udaru $T_1=8 \mu s$ i czas do półszczytu udaru $T_1=20 \mu s$. Kształt przebiegu określony został funkcją dwuwykładniczą:

$$i(t) = I_m(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (6.26)$$

przy czym, parametry I_m , α oraz β dobrano tak, aby uzyskać najwierniejsze przybliżenie udaru znormalizowanego [173], co prezentuje rysunek 6.14.



Rys. 6.14. Przebieg udaru prądowego [173]

Analizy przepięć atmosferycznych pod kątem oddziaływania na elektroenergetyczne systemy przesyłowe i dystrybucyjne są dobrze udokumentowane w literaturze, czego przykładem są następujące publikacje [5, 31, 41, 51, 72, 76, 92, 95, 130, 136, 137, 156, 160, 171, 179]. Dokumenty te zawierają szczegółowy opis wyboru modeli i przeprowadzenia analiz biorąc pod uwagę wiele przykładów zamodelowania układów rzeczywistych, również zawierających potwierdzenie wyników analiz przy pomocy pomiarów. Ze względu na fakt, że niniejsza rozprawa

dotyczy przede wszystkim procesu prawidłowego doboru ograniczników przepięć w liniach kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, co wykonywane jest na etapie przygotowania inwestycji (proces projektowy), część związana z analizą oddziaływań przepięć atmosferycznych jako element analizy poawaryjnej nie stanowi zakresu rozprawy.

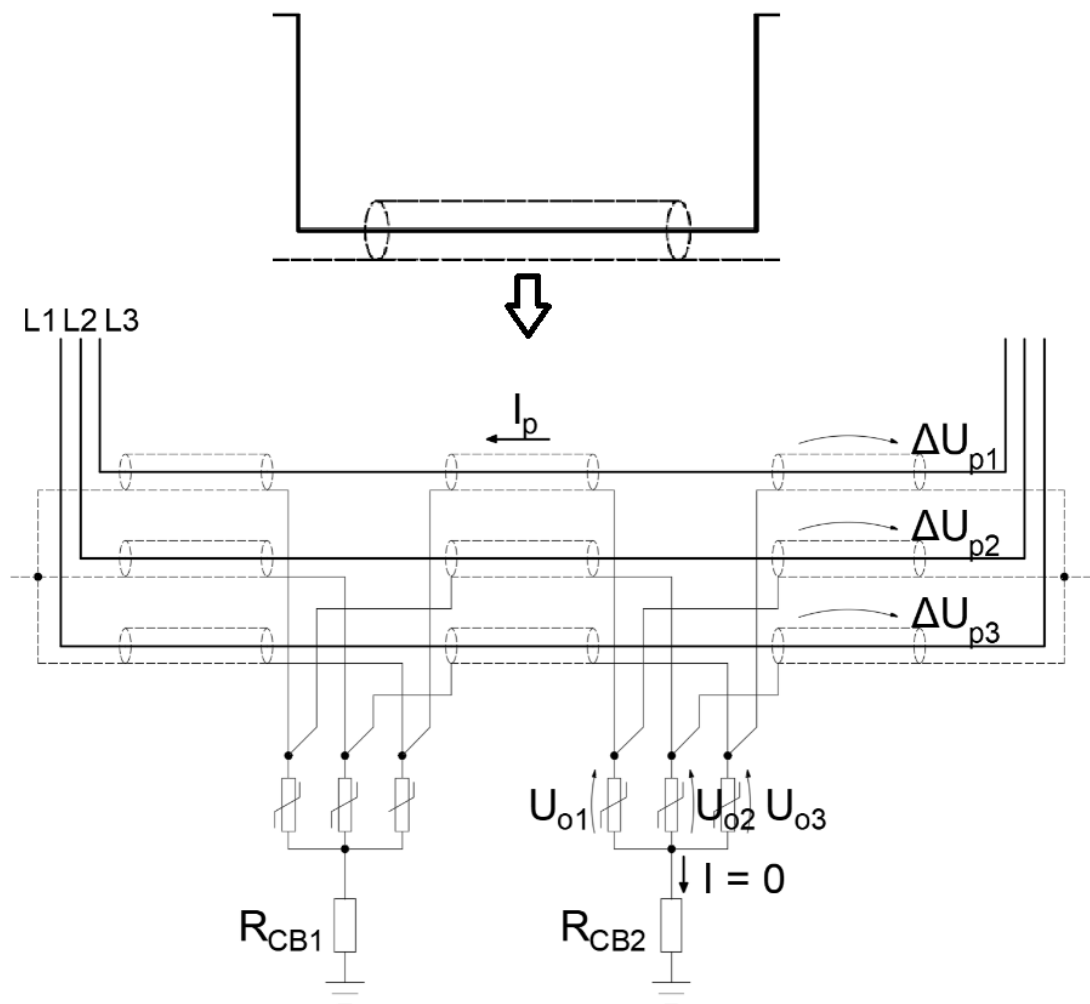
Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne opisane m.in. w [38, 161] wyraźnie wskazują, że zastosowanie SVL z poprawnie dobranymi parametrami, z gruntu eliminuje konieczność zaawansowanych i bardzo specjalistycznych analiz przepięć udarowych. Natomiast niezbędne jest wykonanie obliczeń i analiz przepięć dorywczych, przede wszystkim w celu właściwego doboru parametrów ograniczników przepięć SVL, a proces ten, co dogłębnie zostało przez autora przedstawione w poprzedzających rozdziałach, nie jest w sposób pełny i kompleksowo ujęty w dostępnej literaturze.

Autor dogłębnie przeanalizował dostępne cząstkowe metody obliczeń napięć indukowanych w ekranach metalicznych kabli oraz związane z tym obszarem zagadnienia i zaproponował nowy autorski proces, który w wyczerpujący sposób pozwala na analizę przepięć w powłokach kabli 110 kV w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych i określenie parametrów elektrycznych ograniczników przepięć SVL.

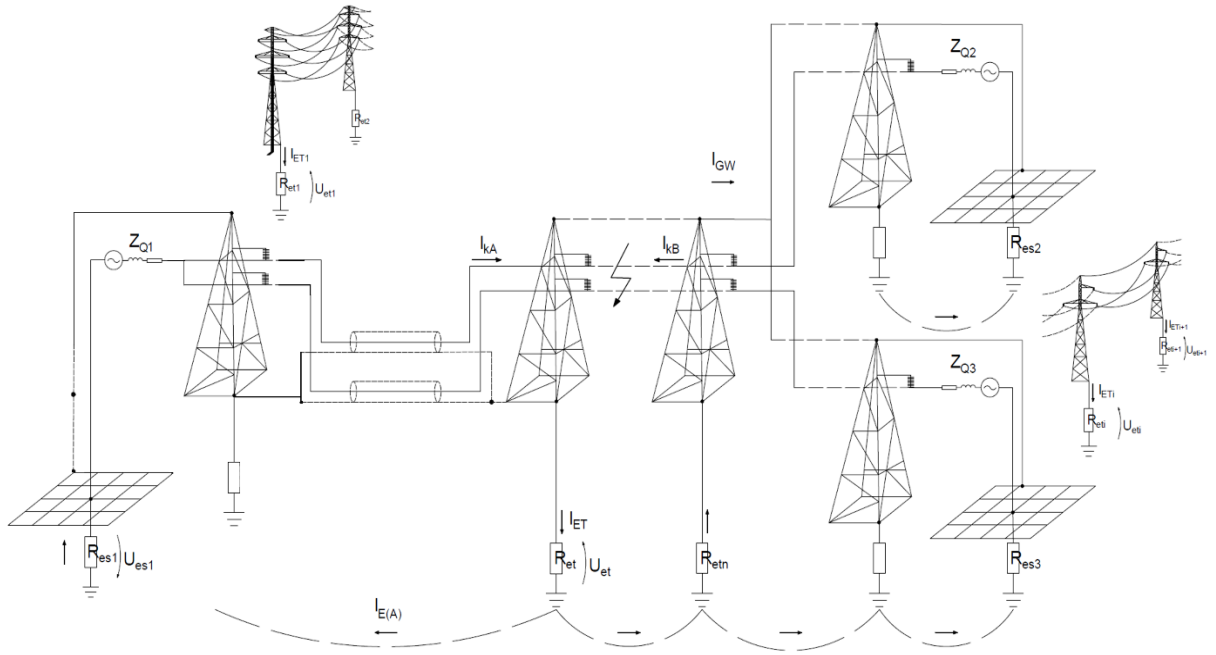
7. Wyniki obliczeń i symulacji

7.1. Opis badanych układów.

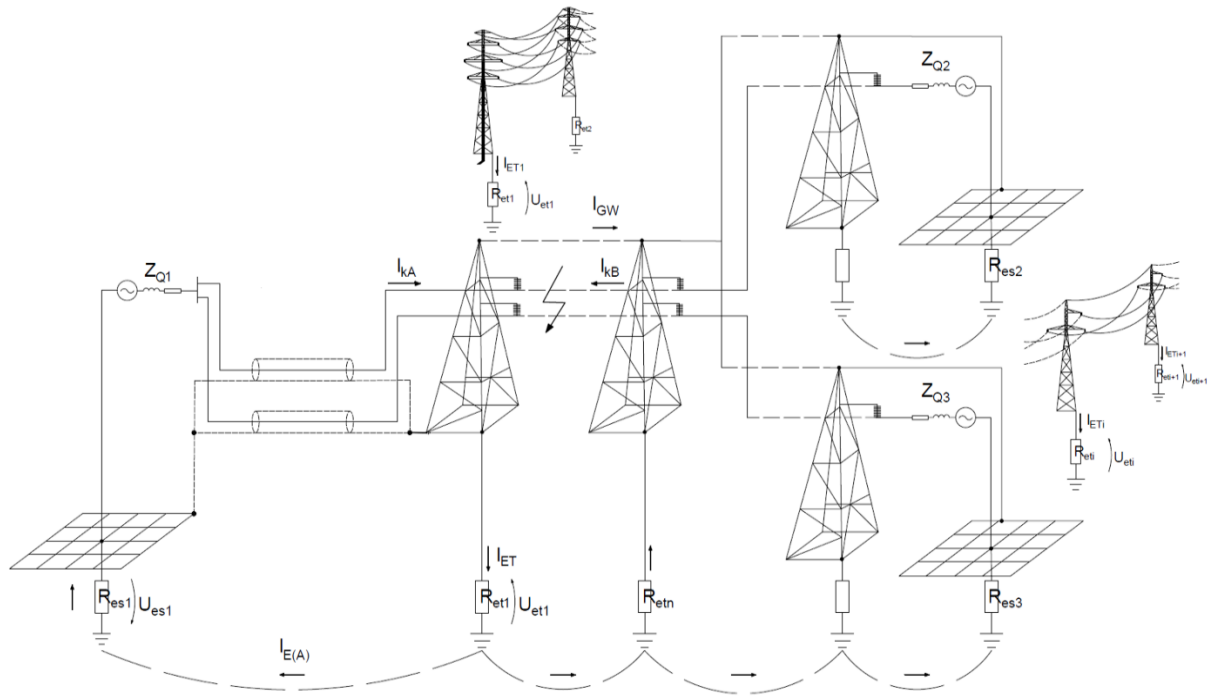
Do zaprezentowania przedstawionej w rozprawie metodologii analizy przepięć i doboru parametrów ograniczników przepięć wykorzystano dwa układy przedstawiające rzeczywiste projekty linii wykonywane na potrzeby Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD) na styku z siecią przesyłową. Pierwszy układ przedstawia dwutorową linię kablowo-napowietrzną typu syfon z zastosowanym krzyżowaniem żył powrotnych przedstawiony schematycznie na rysunku 7.2, który w formie skróconej przywoływany jest w tekście jako układ CB. Drugi analizowany układ to skablowanie dwutorowej linii napowietrznej na podejściu do stacji Operatora Systemu Przesyłowego (OSP), który również zrealizowany jest jako układ CB, a jego schemat przedstawia rysunek 7.3. Na rysunku 7.1 zaprezentowano przyjętą w dalszej części symbolikę oznaczeń.



Rys. 7.1. Przyjęta symbolika oznaczeń na rysunkach 7.2 i 7.3.



Rys. 7.2. Analizowana linia kablowo-napowietrzna 110 kV typu syfon z zastosowanym krzyżowaniem żył powrotnych.



Rys. 7.3. Skablowanie w układzie CB dwutorowej linii napowietrznej 110 kV na podejściu do stacji OSP.

PARAMETRY UKŁADU 1

Badany układ, który w uproszczonej postaci przedstawiono na rysunku 7.2, tworzą dwie stacje elektroenergetyczne OSD (nr 2 i nr 3) zasilone ze stacji OSP (nr 1) dwutorową linią napowietrzną

na konstrukcjach typu EWDN (słupy rurowe, przewód roboczy 6 x AFL-10 310, linka odgromowa – 2 x OPGW o średnicy 15 mm², średnia długość przęsła ok 230 m) o długości ok 3 km, następnie linią kablową dwutorową z kablami typu XRUHKXS 1x800RMC/95 64/110(123) kV, o długości ok 5,7 km, wprowadzoną ponownie na słupy typu EWDN na odcinku ok 0,6 km, do wpięcia w istniejącą linię napowietrzną wybudowaną na słupach typu S24 w kierunku stacji nr 2 oraz na słupach typu B2 w kierunku stacji nr 3 (przewód roboczy typu AFL-6 240 linka odgromowa typu OPGW o średnicy 12.6 mm², średnia długość przęsła wynosząca 200 m w kierunku stacji nr 2 oraz 230 m w kierunku stacji nr 3). Linię kablową dwutorową ułożono w układzie trójkątnym na styk na głębokości 1,2 m przy zachowaniu 2 m odległości pomiędzy torami. Zastosowano dwie główne sekcje CB, w podziale na 3 odcinki po 950 m każdy, przewody połączeniowe ekranów do skrzynek CB mają długość 6 m. W tabeli 7.1 umieszczono dane zwarciove otrzymane od OSP dla analizowanego fragmentu systemu.

Tabela 7.1. Dane zwarciove

| Rozdzielnia 110 kV | Szw [GVA] | 3F [kA] | 1F [kA] | 3I0 [kA] | X0/X1 [-] |
|-----------------------|--------------|------------|------------|-------------|--------------|
| Nr 1 | 3,1 | 16,5 | 18,2 | 18,2 | 0,71 |
| Udział od 2 | 0.2 | 1,2 | 1,2 | 1,0 | |
| Udział od 3 | 0.5 | 2,6 | 2,2 | 0,9 | |
| Nr 2 | 2,3 | 12,0 | 11,1 | 11,1 | 1,24 |
| Udział od 1 | 1,2 | 6,4 | 5,9 | 6,0 | |
| Nr 3 | 1,8 | 9,5 | 6,8 | 6,8 | 2,14 |
| Udział od 1 | 0,8 | 4,3 | 3,3 | 3,6 | |

W obliczeniach analitycznych oraz symulacji komputerowej zastosowano uproszczony sposób odwzorowania kabli (jako współosiowe walce o zadanych parametrach elektrycznych i magnetycznych), skąd wynikają pewne ograniczenia w możliwości obliczenia parametrów elektrycznych linii kablowej na podstawie konfiguracji geometrycznej oraz wiernego oddania budowy kabla. W celu uzyskania prawidłowych wartości parametrów elektrycznych, zastosowano przekształcenie rzeczywistych parametrów technicznych zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 6. Zestawienie parametrów kabli po przekształceniach zawarto tabeli 7.2.

Wykonując obliczenia rozplywów prądów zwarciowych, założono zwarcie odległe oraz, że następuje ono w momencie, gdy napięcie zwartej fazy A przechodzi przez zero, czyli przy wystąpieniu prądu zwarciowego udarowego. Do wymiarowania ograniczników przepięć niezbędne jest przeprowadzenie obliczeń maksymalnych wartości napięć indukowanych, które wystąpią przy założeniu zwarcia bezpośrednio na słupie kablowym, tj. przy przepływie maksymalnego prądu zwarciowego analizowaną linią kablową, lub wywołujące największe wartości wzrostu lokalnego potencjału ziemi, mającego bezpośredni wpływ na wypadkowe napięcie odkładające się na zaciskach ogranicznika przepięć.

Tabela 7.2. Parametry kabla po przekształceniach (zgodnie procedurą opisaną w podrozdziale 6.3.1)

| Lp. | Parametry kabla | XRUHKXS 1x800RMC/95 64/110(123) kV |
|-----|-----------------|------------------------------------|
| 1 | r1 | 17,50 mm |
| 2 | r2 | 35,35 mm |
| 3 | r3 | 37,25 mm |
| 4 | r4 | 41,00 mm |
| 5 | ρ_c' | $2,1263 \cdot 10^{-8} \Omega m$ |
| 6 | ρ_s' | $6,0994 \cdot 10^{-8} \Omega m$ |
| 7 | ϵ_{r1} | 2,844 |
| 8 | ϵ_{r2} | 2.400 |
| 9 | ρ_g | 100 Ωm |

Obliczenia wykonano przyjmując następujące dane stałe układu: $R_{es1}=0,4 \Omega$, $R_{es2}=1,5 \Omega$, $R_{es3}=1,5 \Omega$, $R_t=5 \Omega$ (rezystancje uziemień słupów kablowych), $R_{eti}=10 \Omega$ (rezystancje uziemień słupów linii napowietrznej dla $i=2, \dots, n$ oraz rezystancje uziemień skrzynek CB).

Do przeprowadzenia procedury obliczeniowej napięć indukowanych przy pomocy obliczeń z założeniem sprowadzenia analizowanego systemu do układu jednofazowego, w tym również przy wykorzystaniu wzorów uproszczonych zaczerpniętych z [35, 47] oraz obliczeń metodą CIM należało uprzednio wyznaczyć warunki brzegowe napięć i prądów w badanym układzie, a przede wszystkim przeprowadzić analizę rozplywu prądu zwarcioowego w celu wyznaczenia wartości udziałów prądu od poszczególnych stacji. W zależności od przyjętej procedury istotnym jest wyznaczenie udziałów prądu zwarcioowego lub udziałów potrójnej wartości składowej zerowej prądu zwarcia. Szczegółowe obliczenia dla analizowanych w rozprawie układów niezależnie od przyjętej metody obliczeń napięć indukowanych wymagają zastosowania technik komputerowych, w oparciu o obliczenia np. przy pomocy metody potencjałów węzłowych lub też jako wynik symulacji komputerowych i stanowią dane wejściowe, jednakowe dla każdej metody obliczeniowej. Z powodu znacznego rozbudowania objętościowego obliczeń zarówno dla układu jednofazowego jak i metody CIM proces obliczeniowy układu 1 umieszczono w załącznikach oznaczonych symbolami A.1 i A.2.

PARAMETRY UKŁADU 2

Badany układ, który w uproszczonej postaci przedstawiono na rysunku 7.3, jest analogiczny do układu 1 z tą różnicą, że zmienia się lokalizacja linii kablowej względem napowietrznej. Układ 2 tworzą dwie stacje elektroenergetyczne OSD (nr 2 i nr 3) zasilone ze stacji OSP (nr 1) dwutorową linią kablową z kablami typu XRUHKXS 1x800RMC/95 64/110(123) kV, o długości ok 5,7 km, wprowadzoną na słup kablowy typu EWDN. Następnie linię zrealizowano jako napowietrzną

dwutorową, na konstrukcjach typu EWDN (słupy rurowe, przewód roboczy 6 x AFL-10 310, linka odgromowa – 2 x OPGW o średnicy 15 mm² średnia długość przęsła ok 230 m) o długości ok 7 km, do wpięcia w istniejącą linię napowietrzną wybudowaną na słupach typu S24 w kierunku stacji nr 2 oraz na słupach typu B2 w kierunku stacji nr 3 (przewód roboczy typu AFL-6 240 linka odgromowa typu OPGW o średnicy 12.6 mm², średnia długość przęsła wynosząca 200 m w kierunku stacji nr 2 oraz 230 m w kierunku stacji nr 3). Linię kablową dwutorową ułożono w układzie trójkątnym na styk na głębokości 1,2 m przy zachowaniu 2 m odległości pomiędzy torami. Zastosowano dwie główne sekcje CB, w podziale na 3 odcinki po 950 m każdy, przewody połączeniowe ekranów do skrzynek CB mają długość 6 m. Parametry zwarciove systemu, jak również parametry stałe układu wraz z parametrami kabla 110 kV po przekształceniach są jednakowe jak przyjęto w układzie 1. Proces obliczeniowy układu 2 w zakresie obliczeń z zastosowaniem układu jednofazowego jak również metody CIM umieszczono w załącznikach oznaczonych symbolami B.1 i B.2.

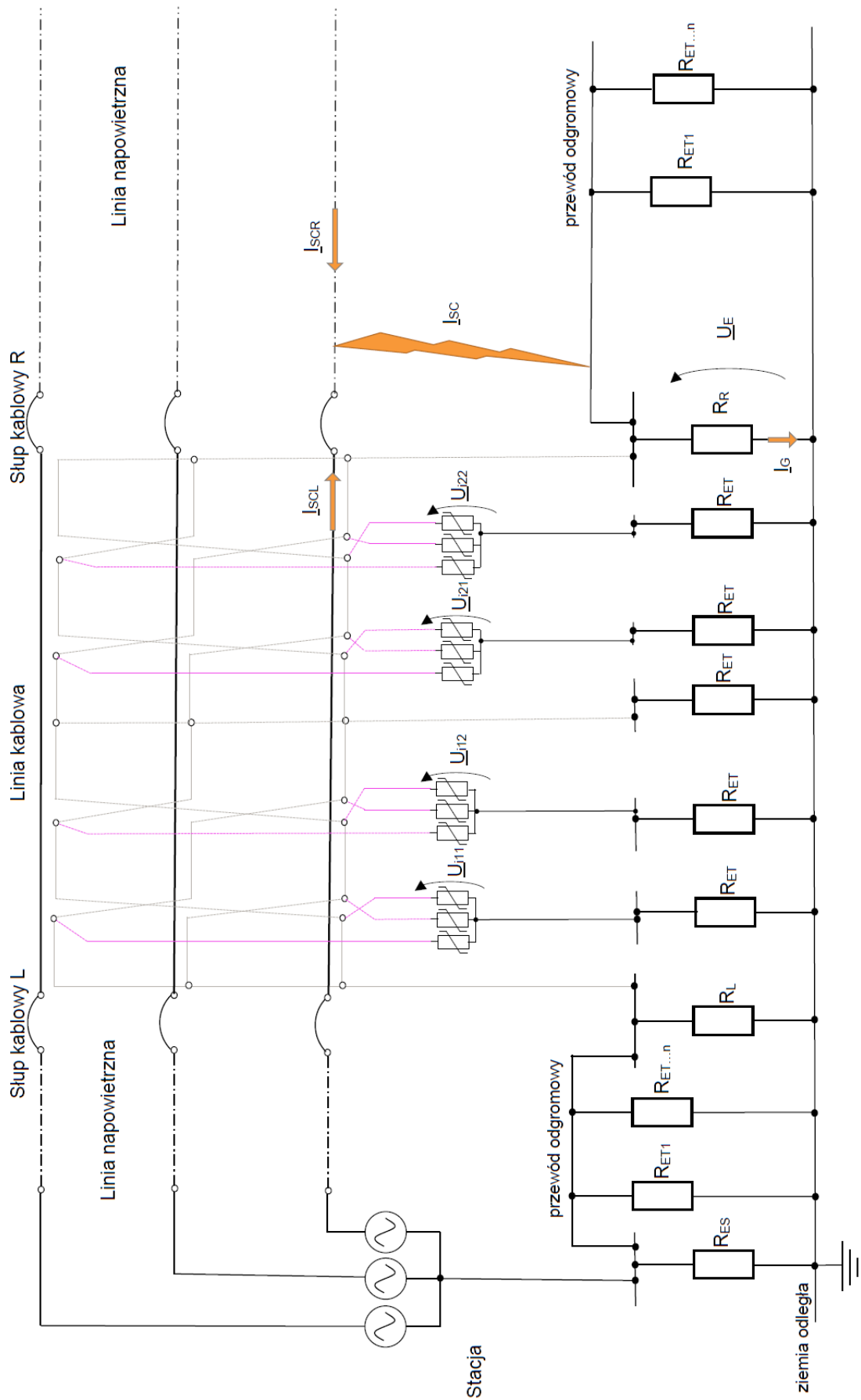
7.2. Zakres obliczeń i wyniki

Obliczenia wykonano dla następujących rodzajów zwarć ujętych w kolejności zgodnej z częstością ich występowania w systemie elektroenergetycznym wg [91], tj.:

1. zwarcie jednofazowe – oznaczone jako K1,
2. zwarcie dwufazowe z ziemią – oznaczone jako K2E,
3. zwarcie dwufazowe – oznaczone jako K2,
4. zwarcie trójfazowe/trójfazowe z ziemią – oznaczone jako K3/K3E.

Na rysunku 7.4 zaprezentowano schemat przedstawiający przyjętą konwencję oznaczeń napięć i prądów w układzie 1, natomiast w tabeli 7.3 zestawiono wyniki obliczeń z wynikami symulacji w ATP-EMTP. Informacyjnie ujęto wyniki symulacji również dla toru 1-3. Na rysunku 7.5 zaprezentowano schemat przedstawiający przyjętą konwencję oznaczeń napięć i prądów w układzie 2, natomiast w tabeli 7.4 zestawiono wyniki obliczeń. Wyróżnione kolorem żółtym i niebieskim w tabelach 7.3 oraz 7.4 wartości napięć indukowanych są wartościami maksymalnymi, które determinują dobór parametru napięcia ciągłej pracy SVL.

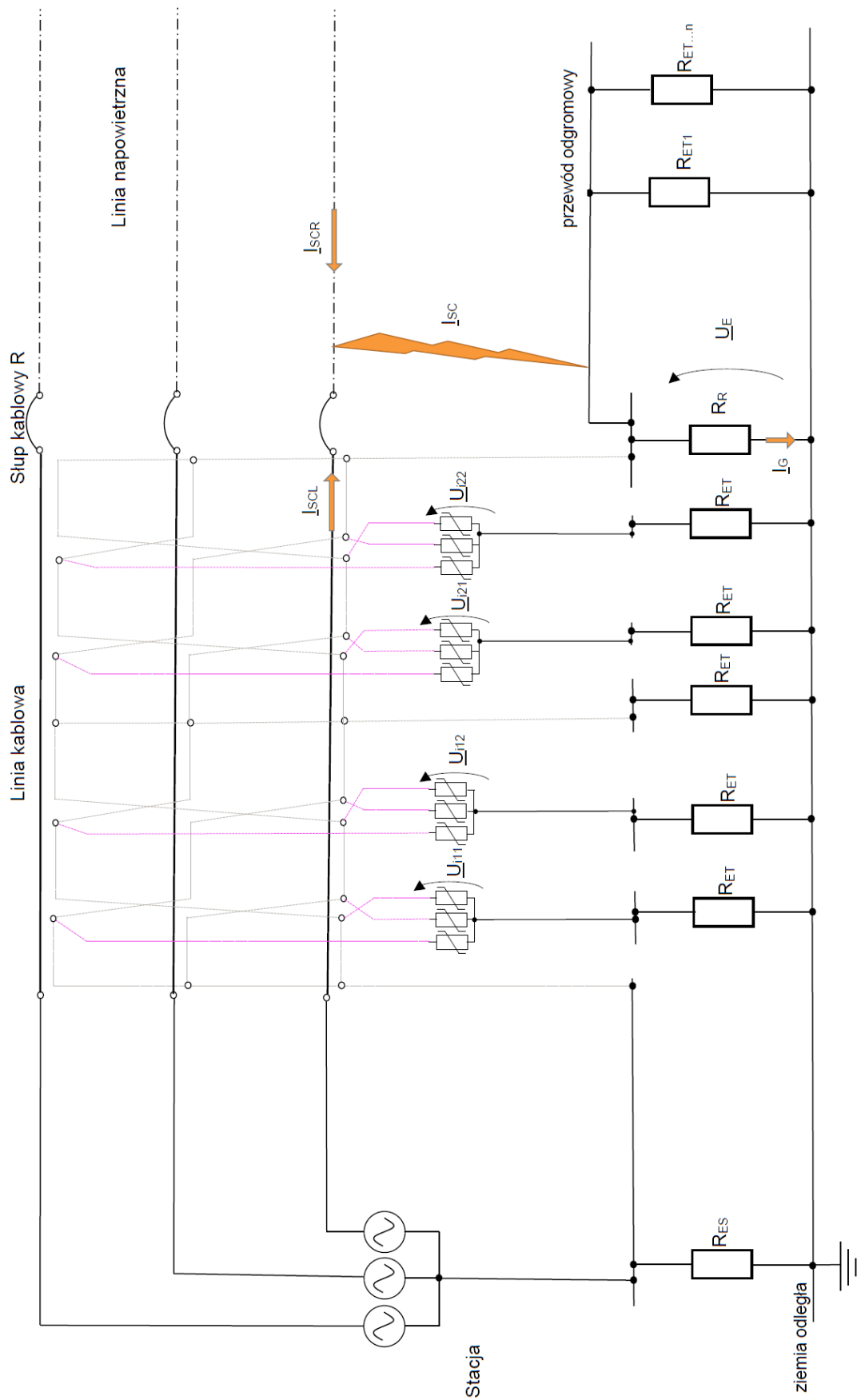
Wykonano również symulację układu 1 w ATP-EMTP przy zastosowaniu dodatkowego kabla ECC (1 kabel ECC wspólny dla obu torów linii kablowej), tego typu obliczenia z zastosowanym CB z użyciem metody CIM byłyby bardzo złożone, a z użyciem modelu 1-fazowego niewykonalne.



Rys. 7.4. Schemat ideowy 1 toru analizowanej linii w układzie 1

Tabela 7.3. Wyniki obliczeń napięć indukowanych układu I dla zwarć w torze 1-2 zaprezentowane jako wartości zespolone w postaci biegunowej

| | | Napięcia na ogranicznikach przepięć | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|--|--|--|--|
| | | Tor 1-2 | | | | | | | | | | | | | | | Tor 1-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Sekcja I | | | | | Sekcja II | | | | | | | | | | Sekcja I | | | | | | Sekcja II | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Isc | IscL | IscR | Ig | UE | 1Ui11a | 1Ui11b | 1Ui11c | 1Ui12a | 1Ui12b | 1Ui12c | 1Ui21a | 1Ui21b | 1Ui21c | 1Ui22a | 1Ui22b | 1Ui22c | 2Ui11a | 2Ui11b | 2Ui11c | 2Ui12a | 2Ui12b | 2Ui12c | 2Ui21a | 2Ui21b | 2Ui21c | 2Ui22a | 2Ui22b | 2Ui22c | | | | | | | |
| [kA] | [kA] | [kA] | [kA] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | | | | | | | | |
| Zwarcie po lewej stronie linii kablowej | K1 | ATP-EMTP | 19,2∠-81 | 12,3∠-83 | 6,9∠103 | 1,3∠-55 | 6,5∠-55 | 6,0∠-56 | 5,9∠-59 | 5,9∠-59 | 5,4∠-60 | 5,4∠-60 | 5,3∠-64 | 4,4∠-65 | 4,3∠-69 | 4,3∠-69 | 3,9∠-69 | 3,9∠-69 | 3,8∠-74 | 5,9∠-59 | 6,0∠-57 | 6,0∠-57 | 5,4∠-63 | 5,4∠-63 | 5,4∠-59 | 4,3∠-70 | 4,4∠-67 | 4,4∠-67 | 3,8∠-72 | 3,8∠-72 | 3,9∠-68 | | | | | | |
| | | CIM | 19,2∠-81 | — | — | 0,8∠39 | 4,1∠39 | 6,4∠46 | | | | | — | | | | | 4,9∠37 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | 19,2∠-81 | 12,3∠-83 | 6,9∠103 | 1,5∠-59 | 7,5∠-59 | 7,5∠-62 | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K2E | ATP-EMTP | 20,5∠-83 | — | — | 1,4∠-111 | 7,1∠-111 | 6,2∠-122 | 6,7∠-115 | 6,4∠-115 | 5,6∠-117 | 5,8∠-116 | 6,0∠-119 | 4,4∠-121 | 4,9∠-125 | 4,6∠-125 | 3,8∠-126 | 4,1∠-125 | 4,3∠-129 | 6,6∠-115 | 6,3∠-113 | 6,4∠-113 | 6,0∠-119 | 5,8∠-118 | 5,6∠-116 | 4,8∠-125 | 4,4∠-123 | 4,6∠-123 | 3,8∠-127 | 4,1∠-125 | 4,3∠-129 | | | | | | |
| | | CIM | 20,5∠-83 | — | — | 0,9∠-24 | 4,4∠-24 | 6,9∠-9 | | | | | — | | | | | 5,2∠-15 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K2 | ATP-EMTP | 16,4∠-56 | — | — | 0,1∠163 | 0,3∠163 | 0,3∠179 | 0,8∠-160 | 0,6∠-165 | 0,9∠-159 | 0,3∠170 | 0,5∠-171 | 0,2∠133 | 0,6∠-167 | 0,4∠-178 | 0,2∠118 | 0,3∠-169 | 0,6∠-169 | 0,9∠-158 | 0,3∠175 | 0,6∠-166 | 0,8∠-161 | 0,5∠-168 | 0,3∠161 | 0,7∠-164 | 0,2∠131 | 0,4∠179 | 0,6∠-166 | 0,3∠176 | 0,2∠110 | | | | | | |
| | | CIM | 16,4∠-56 | — | — | 0,0∠125 | 0,1∠152 | 0,7∠41 | | | | | — | | | | | 0,8∠39 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K3 K3E | ATP-EMTP | 18,8∠-85 | — | — | 0,1∠124 | 0,4∠124 | 0,5∠137 | 0,8∠176 | 1,1∠146 | 0,8∠127 | 0,4∠169 | 1,0∠160 | 0,4∠100 | 0,5∠173 | 0,8∠134 | 1,0∠-169 | 0,8∠138 | 0,5∠167 | 0,8∠-160 | 0,4∠-175 | 0,6∠-166 | 0,7∠-163 | 0,5∠-169 | 0,3∠174 | 0,6∠-167 | 0,2∠151 | 0,4∠178 | 0,5∠-171 | 0,3∠-174 | 0,2∠131 | | | | | | |
| | | CIM | 18,8∠-85 | — | — | 0,0 | 0,1∠93 | 1,1∠72 | | | | | — | | | | | 0,9∠14 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | 18,8∠-85 | — | — | — | — | 1,0∠-81 | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K2E ECC | ATP-EMTP | 20,3∠-83 | — | — | 1,2∠-113 | 6,1∠-111 | 5,3∠-126 | 5,2∠-115 | 5,6∠-117 | 4,9∠-133 | 4,5∠-131 | 4,7∠-121 | 3,8∠-147 | 3,3∠-132 | 3,7∠-134 | 3,6∠-146 | 3,0∠-146 | 3,1∠-129 | — | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zwarcie po prawej stronie linii kablowej | K1 | ATP-EMTP | 19,1∠-81 | 7,3∠-77 | 10,8∠97 | 0,8∠-79 | 3,9∠-79 | 5,5∠-57 | 5,7∠-53 | 5,7∠-53 | 5,1∠-61 | 5,1∠-61 | 5,3∠-56 | 4,4∠-73 | 4,5∠-68 | 4,5∠-68 | 4,2∠-76 | 4,2∠-76 | 4,2∠-70 | 5,5∠-57 | 5,7∠-53 | 5,7∠-53 | 5,1∠-61 | 5,1∠-61 | 5,3∠-56 | 4,4∠-73 | 4,5∠-68 | 4,5∠-68 | 4,2∠-76 | 4,2∠-76 | 4,2∠-70 | | | | | | |
| | | CIM | 19,1∠-81 | — | — | 0,8∠39 | 4,1∠39 | 6,4∠-9 | | | | | — | | | | | 4,9∠37 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | 19,1∠-81 | 7,3∠-77 | 10,8∠97 | 1,3∠-59 | 6,7∠-59 | — | | | | | — | | | | | 6,8∠-47 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K2E | ATP-EMTP | 20,3∠-83 | — | — | 0,8∠-135 | 4,1∠-135 | 6,4∠-113 | 5,8∠-109 | 6,2∠-109 | 6,0∠-117 | 5,6∠-117 | 5,4∠-113 | 5,2∠-127 | 4,5∠-125 | 4,9∠-124 | 4,8∠-131 | 4,5∠-132 | 4,1∠-128 | 6,4∠-113 | 5,9∠-109 | 6,2∠-109 | 6,0∠-117 | 5,6∠-117 | 5,4∠-113 | 5,1∠-127 | 4,5∠-125 | 4,8∠-124 | 4,8∠-130 | 4,5∠-123 | 4,2∠-128 | | | | | | |
| | | CIM | 20,3∠-83 | — | — | 0,9∠-24 | 4,3∠-24 | 6,8∠-9 | | | | | — | | | | | 5,2∠-16 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K2 | ATP-EMTP | 16,1∠-56 | — | — | 0,1∠167 | 0,3∠167 | 0,9∠-157 | 0,3∠164 | 0,6∠-165 | 0,9∠-159 | 0,5∠-170 | 0,2∠151 | 0,7∠-163 | 0,2∠112 | 0,4∠-178 | 0,7∠-163 | 0,3∠172 | 0,2∠99 | 0,9∠-158 | 0,3∠175 | 0,6∠-166 | 0,8∠-161 | 0,5∠-168 | 0,3∠161 | 0,7∠-164 | 0,2∠131 | 0,4∠179 | 0,6∠-166 | 0,3∠176 | 0,2∠110 | | | | | | |
| | | CIM | 16,1∠-56 | — | — | 0,0 | 0,1∠152 | 0,7∠41 | | | | | — | | | | | 0,8∠39 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | | | | | — | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K3 K3E | ATP-EMTP | 18,5∠-86 | — | — | 0,0 | 0,2∠144 | 1,1∠170 | 0,8∠128 | 0,4∠-165 | 0,8∠-170 | 1,0∠143 | 0,3∠118 | 0,8∠164 | 0,7∠109 | 0,2∠-159 | 0,5∠-168 | 0,8∠132 | 0,3∠78 | 1,0∠169 | 0,8∠133 | 0,4∠-171 | 0,7∠-174 | 1,0∠145 | 0,3∠126 | 0,8∠162 | 0,7∠115 | 0,2∠-173 | 0,5∠-174 | 0,8∠135 | 0,3∠85 | | | | | | |
| | | CIM | 18,5∠-86 | — | — | 0,0 | 0,1∠92 | 1,1∠71 | | | | | — | | | | | 0,9∠14 | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Model 1-fazowy | 18,5∠-86 | — | — | — | — | — | | | | | 1,0∠-81 | | | | | — | | | — | | | | | | | | | | | | | | | | |

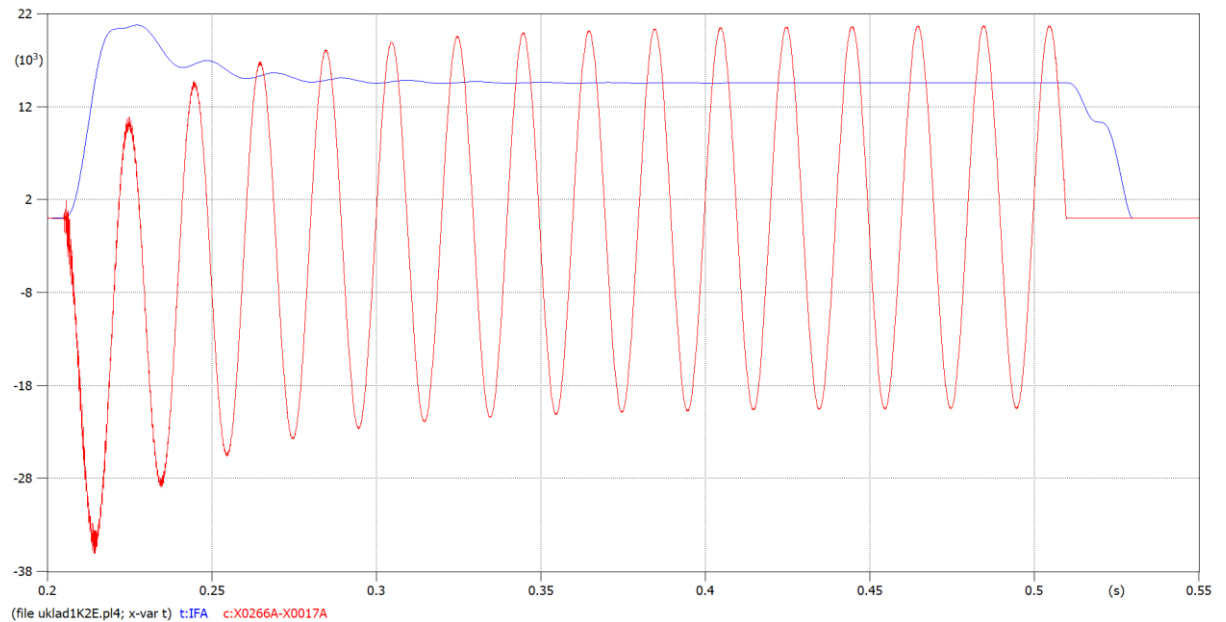


Rys. 7.5. Schemat ideowy 1 toru analizowanej linii w układzie 2

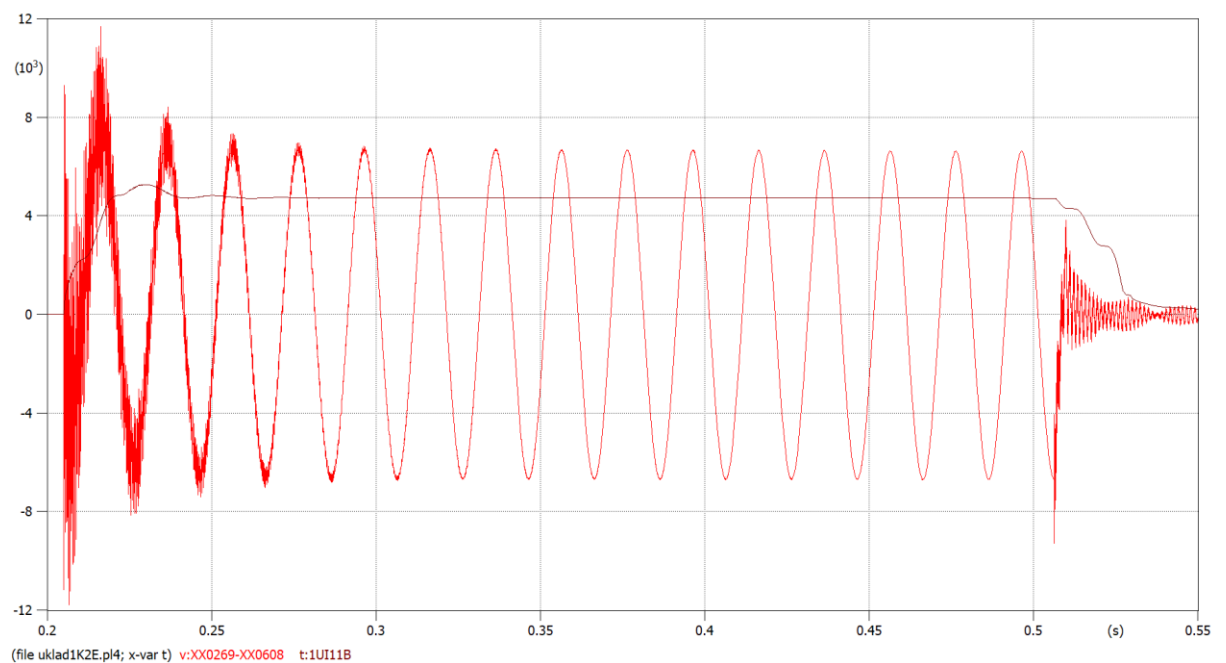
Tabela 7.4. Wyniki obliczeń napięć indukowanych układu 2 dla zwarć w torze 1-2 zaprezentowane jako wartości zespolone w postaci biegunowej

| | | Napięcia na ogranicznikach przepięć | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------|-------------------------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|----------|
| | | Tor 1-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Sekcja I | | | | | | | | | Sekcja II | | | | | | | | | |
| | | I _{sc} | I _{sCL} | I _{SCR} | I _G | U _E | 1U _{i11a} | 1U _{i11b} | 1U _{i11c} | 1U _{i12a} | 1U _{i12b} | 1U _{i12c} | 1U _{i21a} | 1U _{i21b} | 1U _{i21c} | 1U _{i22a} | 1U _{i22b} | 1U _{i22c} | | |
| [kA] | [kA] | [kA] | [kA] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | [kV] | | | |
| Zwarcie na słupie kablowym R | K1 | ATP-EMTP | 23,2∠-85 | 12,4∠-83 | 10,8∠94 | 0,6∠-75 | 3,2∠-75 | 0,5∠-135 | 0,4∠-45 | 0,4∠-45 | 0,8∠-92 | 0,8∠-92 | 1,0∠-52 | 1,9∠-89 | 1,9∠-70 | 1,9∠-70 | 2,4∠-81 | 2,4∠-81 | 2,5∠-66 | |
| | | CIM | 23,2∠-85 | — | — | 0,6∠71 | 3,2∠71 | | | | | | | | | | | | | 2,8∠64 |
| | | Model 1-fazowy | 23,2∠-85 | 12,4∠-83 | 10,8∠94 | 0,5∠-110 | 2,3∠-110 | | | | | | | | | | | | | |
| | K2E | ATP-EMTP | 23,1∠-91 | — | — | 0,7∠-132 | 3,3∠-132 | 0,8∠-150 | 0,2∠54 | 0,4∠-104 | 1,4∠-135 | 0,9∠-155 | 0,4∠-112 | 2,6∠-139 | 1,6∠-135 | 2,1∠-128 | 3,2∠-133 | 2,6∠-138 | 2,2∠-127 | |
| | | CIM | 23,1∠-91 | — | — | 0,6∠-174 | 3,1∠-174 | | | | | | | | | | | | | 3,0∠175 |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | K2 | ATP-EMTP | 18,1∠-57 | — | — | 0,0 | 0,0 | 0,5∠-147 | 0,5∠104 | 0,0 | 0,5∠-147 | 0,0 | 0,5∠34 | 0,5∠-147 | 0,5∠34 | 0,0 | 0,5∠-148 | 0,0 | 0,5∠34 | |
| | | CIM | 18,1∠-57 | — | — | 0,0 | 0,1∠8 | | | | | | | | | | | | | 0,8∠-145 |
| | | Model 1-fazowy | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | K3 K3E | ATP-EMTP | 20,9∠-87 | — | — | 0,0 | 0,0 | 0,6∠-176 | 0,6∠63 | 0,6∠-56 | 0,6∠-116 | 0,6∠124 | 0,6∠4 | 0,6∠-174 | 0,6∠63 | 0,6∠-57 | 0,6∠-116 | 0,6∠126 | 0,6∠2 | |
| | | CIM | 20,9∠-87 | — | — | 0,0 | 0,1∠127 | | | | | | | | | | | | | 1,1∠67 |
| | | Model 1-fazowy | 20,9∠-87 | — | — | 0,0 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | 1,1∠-87 |

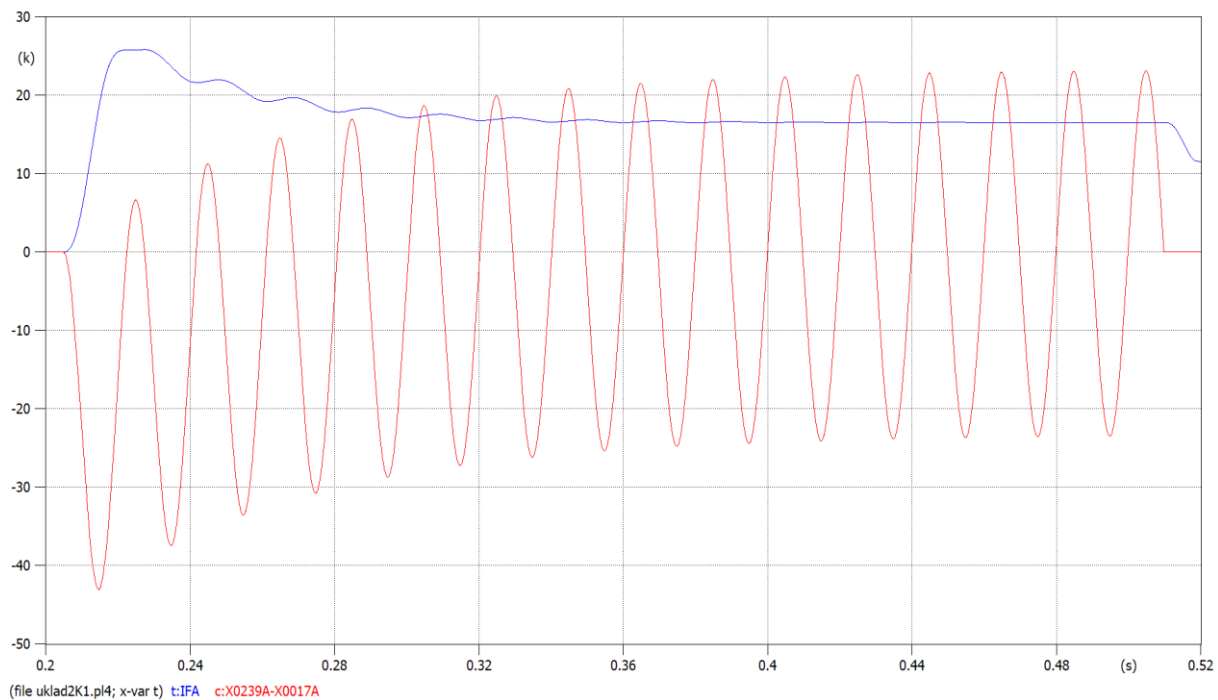
Dodatkowo, w uzupełnieniu do obliczeń zaprezentowanych w tabelach 7.3 i 7.4, zweryfikowano wartość amplitudy składowej nieokresowej napięcia indukowanego na ogranicznikach SVL spowodowanej przepływem prądu zwarciego w żyłach roboczych kabla. Przebiegi obu wielkości dla układu 1, tj. prądu zwarcia oraz napięcia indukowanego zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 7.6 oraz 7.7. Dla układu 2 przebiegi przedstawiono na rysunkach 7.8 i 7.9.



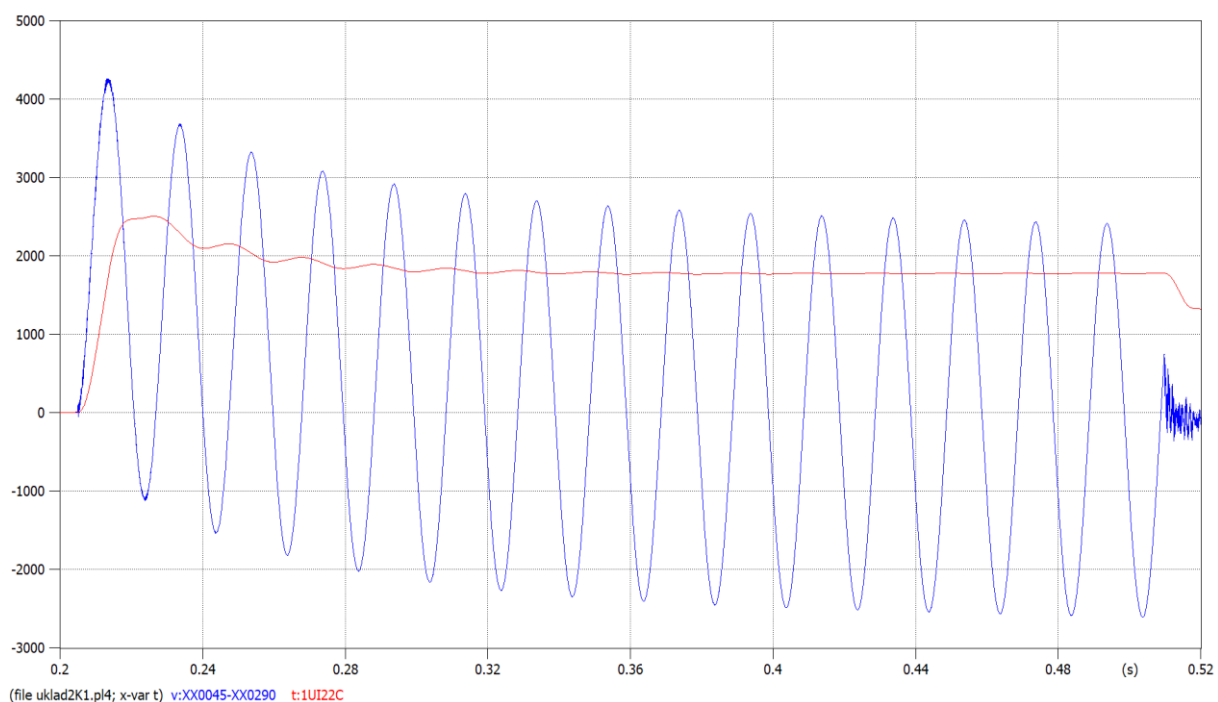
Rys. 7.6. Przebieg prądu zwarciego układ 1 K2E - wartości chwilowej oraz obliczonej chwilowej wartości skutecznej, współczynnik udaru κ wynosi 1,8



Rys. 7.6. Przebieg napięcia indukowanego na SVL, układ 1 K2E - wartości chwilowej oraz obliczonej chwilowej wartości skutecznej - wyznaczony współczynnik udaru W_u wynosi 1,45



Rys. 7.8. Przebieg prądu zwarciovego układ 2 K1 - wartości chwilowej oraz obliczonej chwilowej wartości skutecznej, współczynnik udaru κ wynosi 1,83



Rys. 7.6. Przebieg napięcia indukowanego na SVL, układ 1 K2E - wartości chwilowej oraz obliczonej chwilowej wartości skutecznej - wyznaczony współczynnik udaru W_u wynosi 1,76

Z powyższych przebiegów wynika, że przy współczynniku udaru prądu zwarciovego układu 1 wynoszącym $\kappa=1,8$, współczynnik udaru niezbędny do doboru napięcia trwałej pracy

ogranicznika przepięć SVL ma wartość $W_u=1,45$. Przebiegi dla układu 2 przedstawiają, że dla $\kappa=1,83$, wartość $W_u=1,76$. Nie są to wartości powtarzalne i ściśle zależą od konfiguracji układu, w przypadku braku możliwości wyznaczenia W_u symulacyjnie zalecanym jest przyjęcie $W_u = \kappa$. Wartość współczynnika W_u możliwa jest do wyznaczenia wyłącznie w oparciu o analizę przebiegu wartości chwilowej napięcia indukowanego.

7.3. Wyznaczenie maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia obniżonego U_{res}

Dobór poziomu ochrony jako parametru napięcia obniżonego U_{res} danego ogranicznika SVL, a dokładnie poziomu ochrony przed przepięciami atmosferycznymi U_{pl} oraz poziomu ochrony przed przepięciami łączeniowymi U_{ps} , wykonano przy założeniu wartości, które powinny być mniejsze niż wytrzymałość napięciowa udarowa przekładek izolacyjnych muf separacyjnych oraz osłony zewnętrznej kabla. Autor zaleca przyjęcie wartości napięcia obniżonego o możliwie najniższej wartości, głównie ze względu na fakt, że wytrzymałość napięciowa powłoki zewnętrznej kabla, jeżeli nie jest w wykonaniu specjalnym, nie jest określona w standardach, jak również nie jest sprecyzowany sposób badania tego parametru (przeprowadza się wyłącznie próbę szczelności powłoki).

W uzgodnieniu z producentem kabla przyjmuje się, dla kabli po ułożeniu, zmniejszenie wartości wytrzymałości napięciowej osłony zewnętrznej w stosunku do parametrów normowych – obowiązujących dla kabli nowych po wyprodukowaniu, a wynika to z dopuszczalnego poziomu uszkodzeń w trakcie montażu – rysy i zadrapania powłoki zewnętrznej powstałe podczas przeciągania kabla. Ponadto na wypadek pogorszenia stanu izolacji w czasie, kształtu udaru napięciowego, niejednorodności poszczególnych typów i wyrobów SVL jako wynik procesu produkcyjnego, zakładany jest dodatkowy margines bezpieczeństwa. Także z pierwotnej wartości wytrzymałości napięciowej, która wynosi 37,5 kV ogólnie przyjęta maksymalna dopuszczalna wartość napięcia udarowego wynosi 22,5 kV (zmniejszenie znamionowej wartości po wyprodukowaniu kabla o 40 %). Parametr U_{res} , który zależy od wybranej klasy ogranicznika, należy wyznaczyć w koordynacji ze spadkiem napięcia na przewodach uziemiających i przewodach połączeniowych ekranów. W analizowanych przykładach, zarówno w układzie 1 jak i w układzie 2, długość przewodów połączeniowych ekranów wynosi 6 m, długość przewodu uziemiającego jest pomijalna. Przewody połączeniowe spięte są parami, a ich indukcyjność jednostkowa wynosi 0.3 $\mu\text{H}/\text{m}$. Przy założeniu 10 kA/ μs znamionowego prądu wyladowczego, spadek napięcia na tych przewodach obliczony z zależności $L \times \frac{di}{dt}$ wynosi 6 kV. W uproszczeniu, zgodnie z zaleceniami [146], można przyjąć sumę algebraiczną spadku napięcia na przewodach połączeniowych ekranów i napięcia obniżonego danego ogranicznika przepięć, jako wartość napięcia udarowego występującego na chronionym urządzeniu. Stąd, biorąc pod uwagę również maksymalną dopuszczalną wartość napięcia udarowego dla osłony zewnętrznej o wartości 22,5 kV, napięcie obniżone ogranicznika nie powinno przekraczać wartości 16,5 kV (udar 8/20 μs , dla 10 kA/ μs znamionowego prądu wyladowczego).

W tabeli 7.5 zaprezentowano możliwe do zastosowania ograniczniki przepięć SVL przykładowo wyprodukowane przez firmę Protektel na podstawie karty katalogowej [196].

Na zielono zaznaczono ograniczniki spełniające wyznaczone wartości maksymalnego napięcia obniżonego, tj. gwarantujące założony poziom ochrony. Na żółto podkreślono ogranicznik, którego parametry są maksymalnymi dopuszczalnymi w analizowanych układach. Na czerwono wskazano typoszereg ograniczników, których zgodnie z opisanymi założeniami nie powinno się zastosować, gdyż nie gwarantują wymaganego poziomu ochrony od przepięć udarowych.

Tabela 7.5. Parametry SVL prod. Protektel [196].

| TYP PROXAR-IIW AC | Napięcie znamionowe Ur kV | Maksymalne napięcie ciągłej pracy Uc kV | Napięcie obniżone w kV (wartość szczytowa) przy różnych prądach udarowych | | | | | | | | |
|-------------------------|--|---|---|------|--------------|------|------|---------------|--------|-------|------|
| | | | Udar 1/... μs | | Udar 8/20 μs | | | Udar 30/60 μs | | | |
| | | | 5kA | 10kA | 2.5kA | 5kA | 10kA | 20kA | 0.25kA | 0.5kA | 1kA |
| | | | kV | kV | kV | kV | kV | kV | kV | kV | kV |
| 1.3 | 1.3 | 1.0 | 3.5 | 3.9 | 3.0 | 3.1 | 3.4 | 3.8 | 2.6 | 2.7 | 2.8 |
| 1.7 | 1.7 | 1.3 | 4.2 | 4.7 | 3.6 | 3.8 | 4.1 | 4.6 | 3.1 | 3.2 | 3.4 |
| 2.0 | 2.0 | 1.6 | 6.1 | 6.8 | 5.2 | 5.4 | 5.9 | 6.5 | 4.5 | 4.6 | 4.8 |
| 2.3 | 2.3 | 1.8 | 6.6 | 7.4 | 5.6 | 5.9 | 6.4 | 7.1 | 4.9 | 5.0 | 5.2 |
| 2.5 | 2.5 | 2.0 | 6.7 | 7.5 | 5.7 | 5.9 | 6.5 | 7.2 | 4.9 | 5.1 | 5.3 |
| 3.1 | 3.1 | 2.5 | 8.0 | 9.0 | 6.9 | 7.1 | 7.8 | 8.7 | 5.9 | 6.1 | 6.4 |
| 3.4 | 3.4 | 2.75 | 8.9 | 9.9 | 7.6 | 7.9 | 8.6 | 9.5 | 6.5 | 6.7 | 7.1 |
| 3.8 | 3.8 | 3.0 | 10.8 | 12.1 | 9.2 | 9.6 | 10.5 | 11.7 | 8.0 | 8.2 | 8.6 |
| 4.5 | 4.5 | 3.6 | 12.4 | 13.8 | 10.6 | 11.0 | 12.0 | 13.3 | 9.1 | 9.4 | 9.8 |
| 5.0 | 5.0 | 4.0 | 13.1 | 14.6 | 11.2 | 11.6 | 12.7 | 14.1 | 9.7 | 9.9 | 10.4 |
| 6.0 | 6.0 | 4.8 | 15.9 | 17.7 | 13.6 | 14.1 | 15.4 | 17.1 | 11.7 | 12.0 | 12.6 |
| 6.3 | 6.3 | 5.0 | 16.2 | 18.1 | 13.8 | 14.4 | 15.7 | 17.4 | 11.9 | 12.2 | 12.9 |
| 7.0 | 7.0 | 5.6 | 17.7 | 19.8 | 15.1 | 15.7 | 17.2 | 19.1 | 13.1 | 13.4 | 14.1 |
| 8.0 | 8.0 | 6.4 | 20.2 | 22.6 | 17.3 | 18.0 | 19.7 | 21.8 | 14.9 | 15.3 | 16.1 |
| 9.0 | 9.0 | 7.2 | 22.8 | 25.4 | 19.5 | 20.2 | 22.1 | 24.5 | 16.8 | 17.2 | 18.1 |
| 10.0 | 10.0 | 8.0 | 25.3 | 28.2 | 21.6 | 22.5 | 24.6 | 27.3 | 18.7 | 19.2 | 20.1 |

7.4. Dobór i sprawdzenie parametrów SVL

WYZNACZENIE NAPIĘCIA TRWAŁEJ PRACY U_c – UKŁAD 1

Napięcie trwałej pracy U_c oraz napięcie znamionowe U_r danego SVL zaprezentowane w tabeli 7.6 wyznaczone w oparciu o zależność zaproponowaną przez autora, szczegółowo opisaną w rozdziale 5.3 rozprawy, na podstawie maksymalnych wartości chwilowych napięcia indukowanego dla poszczególnych metod obliczeniowych zawartych w tabeli 7.3. W ostatniej kolumnie tabeli 7.6 umieszczono napięcie znamionowe katalogowe ogranicznika spełniającego warunki napięcia trwałej pracy, którego parametry przedstawia tabela 7.5.

Tabela 7.6. Zestawienie obliczonych wartości napięcia U_c na podstawie wyników obliczeń i symulacji maksymalnych wartości napięć indukowanych dla układu 1

| | U_{im} [kV] | U_i [kV] | W_u | W_b | TOV | U_c [kV] | U_r [kV] |
|----------------|------------------|---------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|
| ATP-EMTP | 6,7 | 4,7 | 1,45 | 1,05 | 1,313 | 5,5 | 7,0 |
| CIM | 6,9 | 4,9 | 1,45 | 1,05 | 1,313 | 5,7 | 8,0 |
| Model 1-fazowy | 7,5 | 5,3 | 1,45 | 1,05 | 1,313 | 6,1 | 8,0 |
| ATP-EMTP (ECC) | 5,6 | 4,0 | 1,45 | 1,05 | 1,313 | 4,6 | 6,0 |

Z przyjętych w rozprawie założeń wynika, że żaden z dobranych ograniczników SVL nie może być zastosowany w układzie 1 ze względu na brak spełnienia wymaganego poziomu ochrony, tj. zbyt dużą wartość napięcia obniżonego. Biorąc to pod uwagę należy tak zmodyfikować konfigurację linii kablowej, aby możliwe było spełnienie przywołanych warunków.

Pierwszym krokiem możliwym do wyznaczenia, wyłącznie w oparciu o wyniki symulacji w ATP-EMTP, jest analiza układu z dodatkowo ułożonym kablem ECC równoległe do projektowanych linii kablowych, który częściowo uniezależnia pracę SVL od lokalnego wzrostu potencjału ziemi. Jak wynika z tabeli 7.6, przy zastosowaniu kabla ECC możliwy jest poprawny dobór parametrów SVL dla układu 1.

Nie jest intencją autora przedstawianie wszelkich możliwych opcji rozwiązania powyższego zagadnienia, gdyż obejmuje ono przede wszystkim optymalizację kosztową, niemniej jednak wskazano możliwości wykorzystania technik komputerowych, w celu szybkiego wyszukania dostępnych opcji spełniających założone warunki.

Drugim sposobem jest skrócenie długości sekcji CB, zwiększenie ich ilości po trasie linii kablowej i ponowne wyznaczenie napięcia trwałej pracy, ale to wymagałoby znacznego skomplikowania układu – koniecznym byłoby utworzenie ok 10 sekcji CB, co oznacza wymóg budowy stanowisk muf w odcinkach co ok 200 m. To rozwiązanie nie ma uzasadnienia ekonomicznego.

Akceptując ograniczenie poziomu ochrony wyłącznie przekładek izolacyjnych muf, tj. przy rezygnacji z ochrony osłony zewnętrznej kabli możliwe jest połączenie SVL w trójkąt lub odziemioną gwiazdę, nie jest to jednak zalecany sposób jeżeli możliwe jest inne poprawne wykonanie układu.

Możliwa jest również rezygnacja z zastosowania cross-bondingu i uziemienie obustronne ekranów metalicznych przy zwiększeniu przekroju żyły roboczej (dostosowanego do wymaganej obciążalności długotrwałej linii kablowej).

Wybór konkretnej konfiguracji systemu kablowego jest podyktowany przede wszystkim optymalizacją kosztową, wstępnie na etapie inwestycyjnym, a następnie pod względem kosztów utrzymania danego obiektu, co jest związane z intensywnością prac eksploatacyjnych oraz stratami energii w związku z przesylem mocy. Autor opierając się na swoim doświadczeniu zawodowym, rekomenduje w tym konkretnym układzie zastosowanie krzyżowania żył powrotnych z ułożonym równoległe kablem ECC jako najbardziej optymalne rozwiązanie pod względem zarówno kosztowym jak i eksploatacyjnym.

Wykorzystanie technik komputerowych umożliwia zbadanie ewentualnego narażenia SVL na przeciążenia związane z pracą w warunkach przewodzenia i analizę skutków cieplnych jako wynik przepływu prądu udarowego linią kablową. Jest to związane z wyznaczeniem/obliczeniem energii pochłanianej przez SVL, w celu indywidualnego określenia parametru przepięcia przejściowego TOV dla napięć indukowanych. W tym przypadku należy liczyć się z koniecznością bardzo precyzyjnego zamodelowania możliwych do wystąpienia najcięższych pod względem pracy SVL warunków, a to wymaga zebrania często niedostępnych dla projektanta danych odnośnie

warunków pracy systemu elektroenergetycznego. Niemniej przykład takiej analizy przedstawiono dla układu 2, jako sprawdzenie poprawności doboru parametrów ograniczników prądów pracujących jako SVL.

WYZNACZENIE NAPIĘCIA TRWAŁEJ PRACY U_c – UKŁAD 2

Napięcie trwałej pracy U_c oraz napięcie znamionowe U_r danego SVL, zaprezentowane w tabeli 7.7, wyznaczono w oparciu o zależność zaproponowaną przez autora, szczegółowo opisaną w rozdziale 5.3 rozprawy, na podstawie maksymalnych wartości chwilowych napięcia indukowanego dla poszczególnych metod obliczeniowych zawartych w tabeli 7.4. W ostatniej kolumnie tabeli 7.7 umieszczono napięcie znamionowe ogranicznika spełniającego warunki napięcia trwałej pracy, którego parametry przedstawia tabela 7.5. Obliczenia wykonane w oparciu o model 1-fazowy, wyróżnione w tabeli 7.7 wskazują potencjalnie zbyt małą wartość napięcia indukowanego w porównaniu do pozostałych metod obliczeniowych.

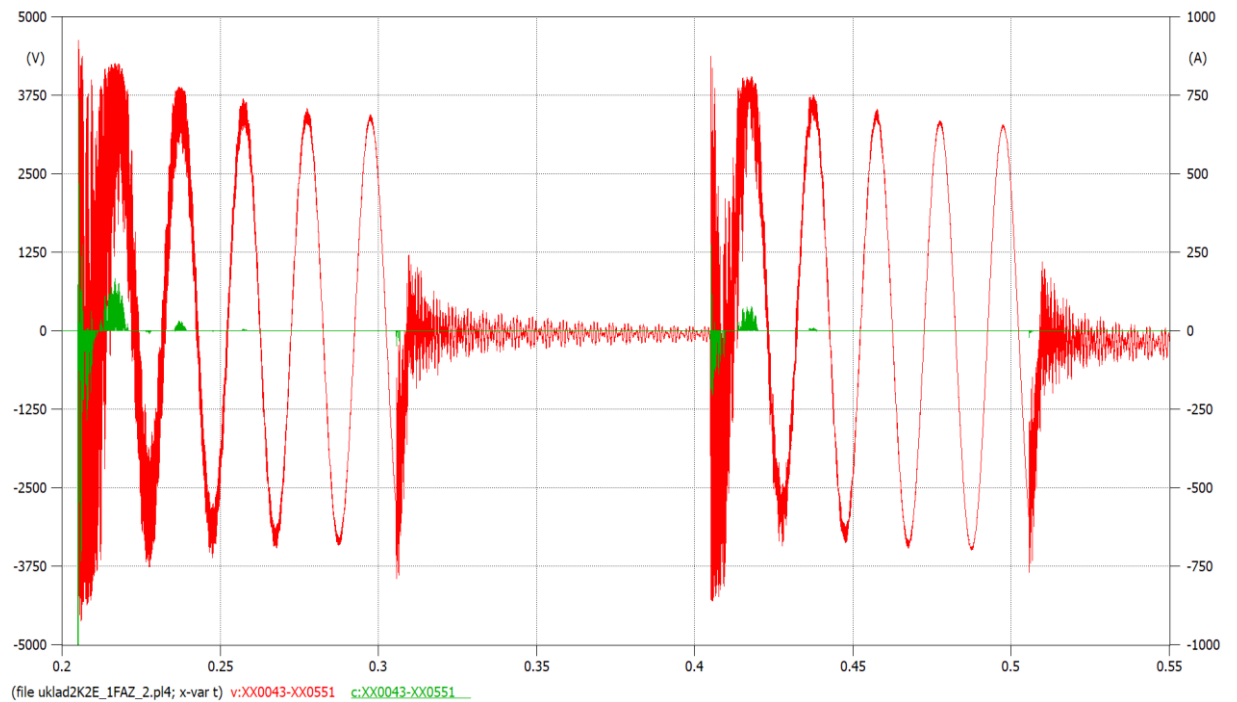
Tabela 7.7. Zestawienie obliczonych wartości napięcia U_c na podstawie wyników obliczeń i symulacji maksymalnych wartości napięć indukowanych dla układu 2

| | U_{im} [kV] | U_i [kV] | W_u | W_b | TOV | U_c [kV] | U_r [kV] |
|-----------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| ATP-EMTP | 3,2 | 2,3 | 1,76 | 1,05 | 1,313 | 3,6 | 4,5 |
| CIM | 3,0 | 2,1 | 1,76 | 1,05 | 1,313 | 3,0 | 3,8 |
| Model 1-fazowy | 1,8 | 1,3 | 1,76 | 1,05 | 1,313 | 1,8 | 2,3 |

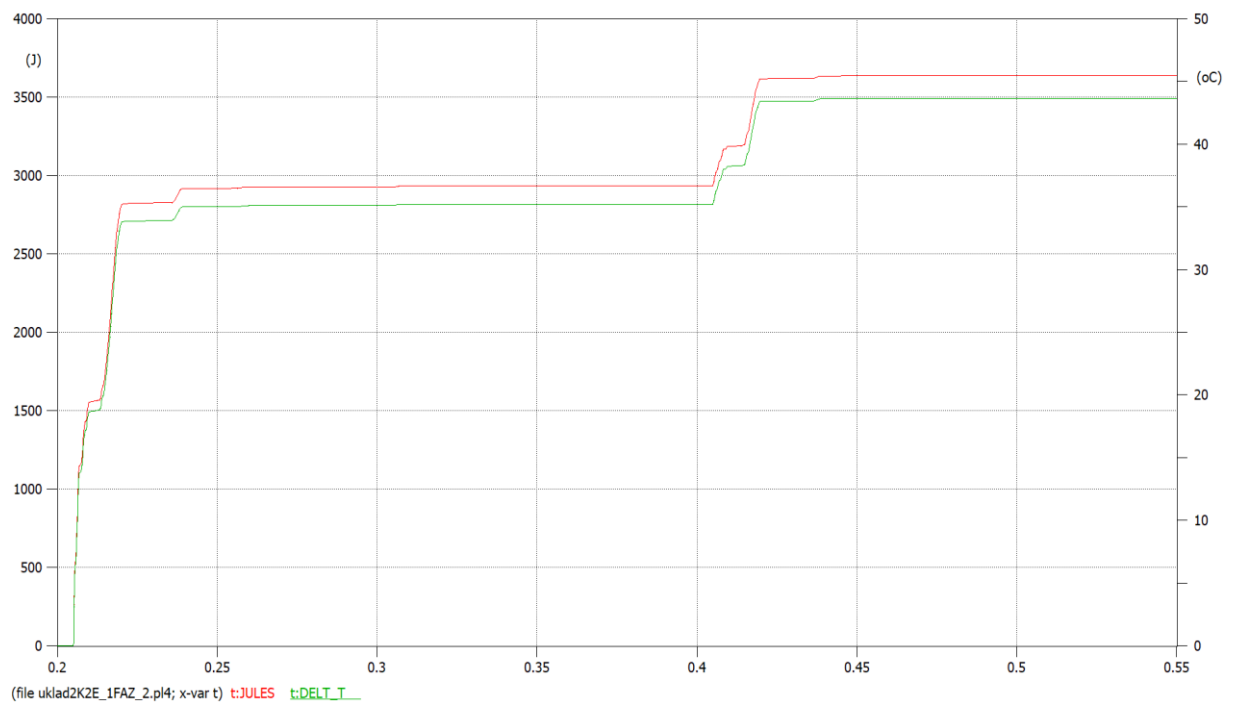
Aby zweryfikować potencjalne ryzyko błędnego doboru parametrów SVL przy zastosowaniu obliczeń wyłącznie w oparciu o model 1-fazowy i skutki, jakie może to nieść, wykonano w oprogramowaniu ATP-EMTP analizę wg zaproponowanej przez autora metodologii przedstawionej w rozdziale 5 i 6 rozprawy. Wynikiem analizy są przebiegi wartości chwilowej prądu przewodzenia, na bazie których wyznaczono wartości mocy chwilowych oraz wydzielanej energii w SVL, co pozwoliło na określenie temperatury ogranicznika w wyniku jego zadziałania w momencie przepływu linią kablową prądu zwarciovego udarowego. Założono, że linia kablowo-napowietrzna wyposażona jest w automatykę SPZ.

Analizy wykonano dla trzech typów ograniczników, w pierwszym przypadku zastosowano zaproponowaną procedurę doboru parametrów SVL opisaną w niniejszej rozprawie w rozdziale 5. W drugim przypadku dobrano ogranicznik, którego napięcie trwałej pracy jest wyższe niż wartość skuteczna napięcia indukowanego wyznaczonego w oparciu o obliczenia oparte na modelu jednofazowym (wg wytycznych PSE [35]) bez uwzględnienia parametru TOV. W ostatnim kroku uwzględniono parametr TOV zgodnie z [35]. Wyznaczone przebiegi napięcia na zaciskach ogranicznika, prądu przewodzenia, ilości wydzielonej energii oraz wzrostu temperatury dla SVL o napięciu znamionowym $U_r=2,3$ kV zaprezentowano na rysunkach 7.7 oraz 7.8. Dla SVL o napięciu znamionowym $U_r=2,0$ kV ($U_c=1,6$ kV) wykresy przedstawiono na rysunkach 7.9 oraz

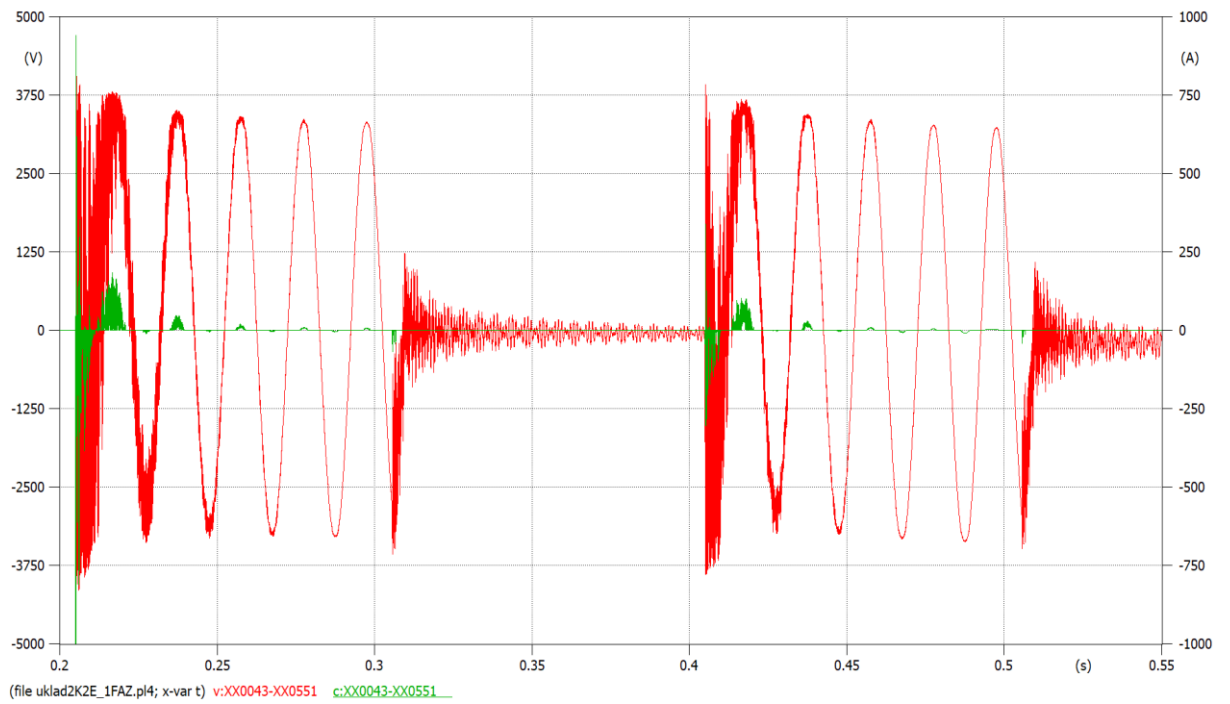
7.10, natomiast dla SVL o $U_r=1,7$ kV ($U_c=1,3$ kV) na rysunkach 7.11 oraz 7.12. W tabeli 7.7 zebrano poszczególne dane.



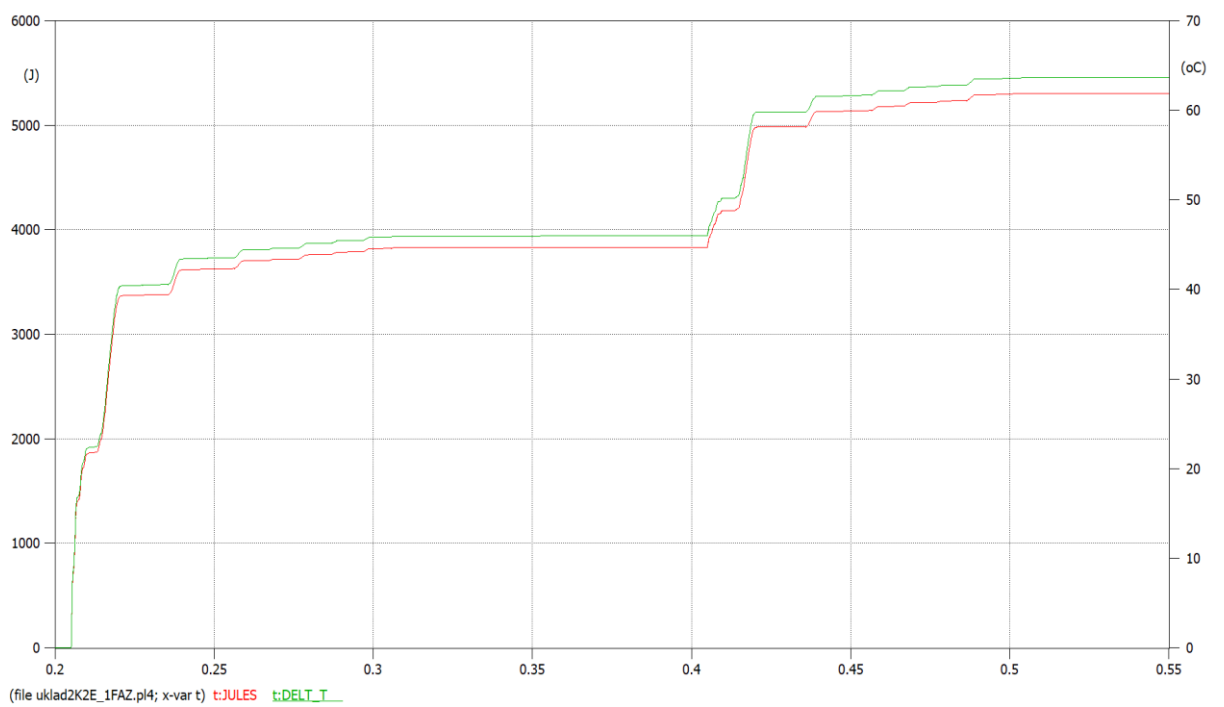
Rys. 7.7. Przebiegi napięcia indukowanego na zaciskach SVL oraz prądu przewodzenia – układ 2, $U_r=2,3$ kV



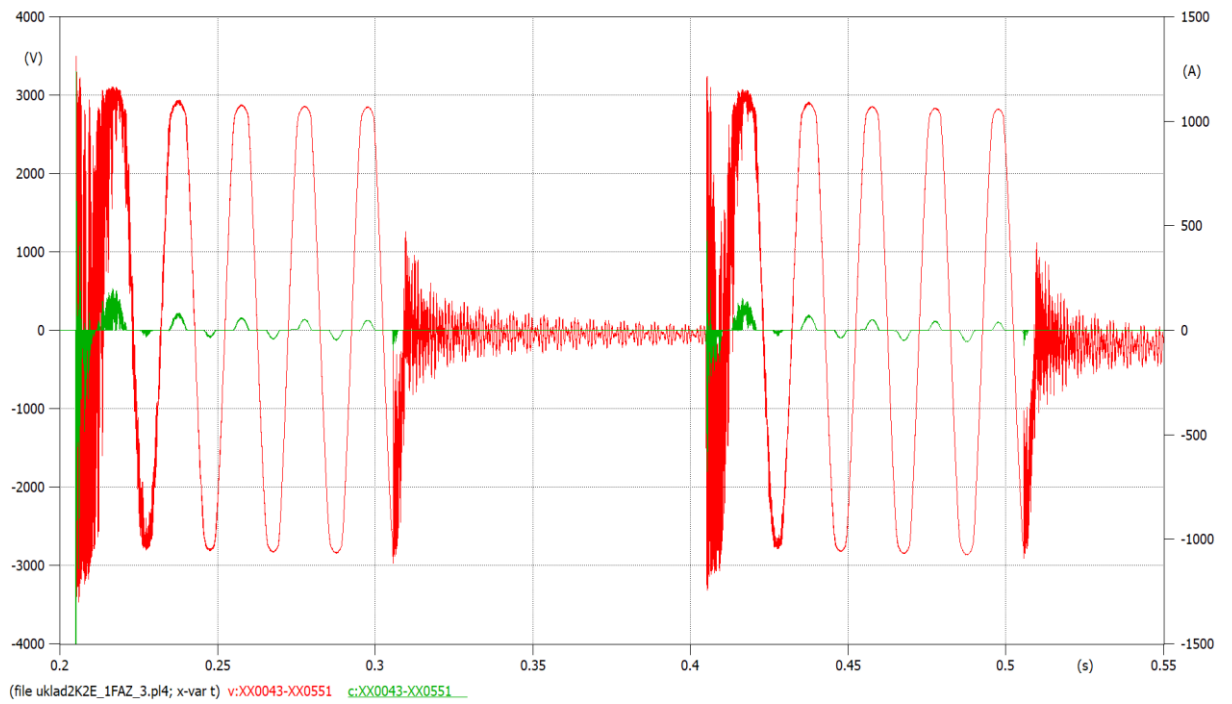
Rys. 7.8. Przebiegi wydzielanej energii na SVL oraz wzrostu jego temperatury – układ 2, $U_r=2,3$ kV



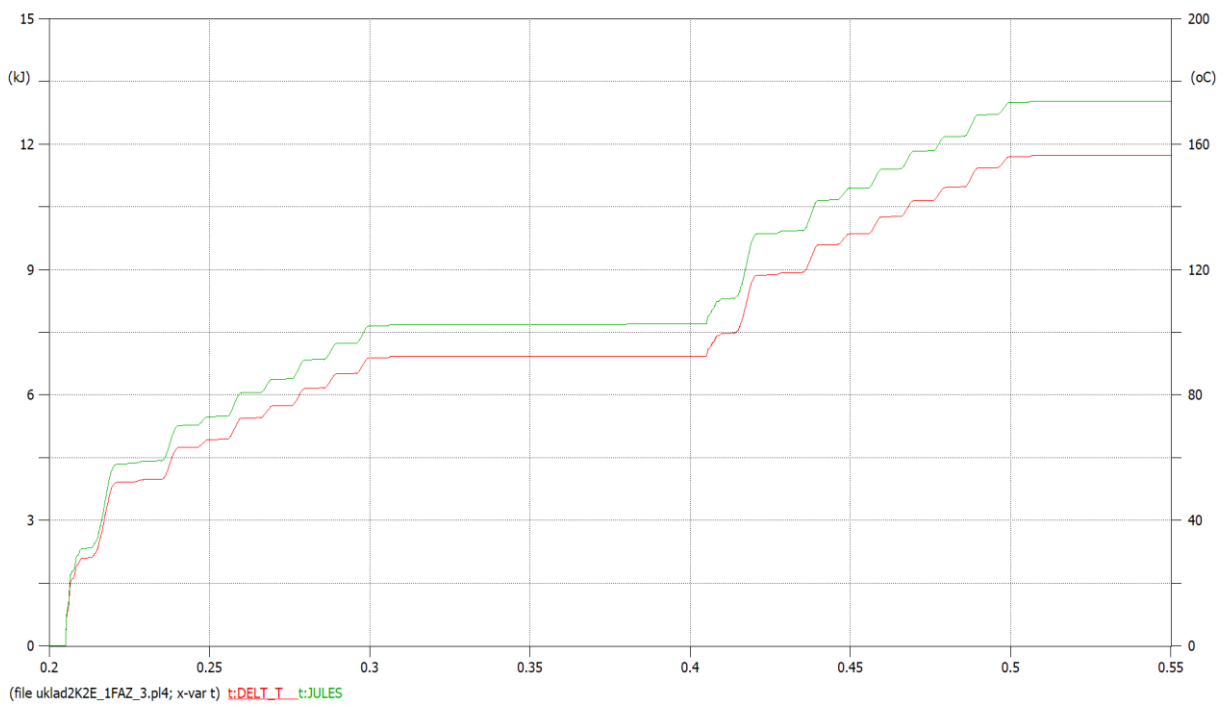
Rys. 7.9. Przebiegi napięcia indukowanego na zaciskach SVL oraz prądu przewodzenia – układ 2, $U_r=2,0$ kV



Rys. 7.10. Przebiegi wydzielanej energii na SVL oraz wzrostu jego temperatury – układ 2, $U_r=2,0$ kV



Rys. 7.11. Przebiegi napięcia indukowanego na zaciskach SVL oraz prądu przewodzenia - układ 2, $U_r=1,7 \text{ kV}$



Rys. 7.12. Przebiegi wydzielanej energii na SVL oraz wzrostu jego temperatury – układ 2, $U_r=1,7 \text{ kV}$

Przedstawione przebiegi, w szczególności wydzielanej energii na SVL i wzrostu jego temperatury, których wartości końcowe zestawiono i zaprezentowano w tabeli 7.8, wskazują, przy założeniu następujących danych:

- temperatury początkowej ogranicznika wynoszącą $T_a=20^{\circ}\text{C}$,
- temperatury dopuszczalnej $T_d=105^{\circ}\text{C}$, gdzie ogranicznik znajduje się jeszcze w fazie stabilności cieplnej,
- temperatury końcowej $T_k=190^{\circ}\text{C}$, przy której można stwierdzić potencjalne uszkodzenie ogranicznika,

na fakt, że we wszystkich przypadkach bazujących na wynikach obliczeń napięcia indukowanego przy pomocy modelu 1-fazowego w układzie 2, napięcie trwałej pracy SVL zostało nieprawidłowo dobrane. Niemniej dzięki wykorzystaniu procedury przedstawionej w niniejszej rozprawie w rozdziale 5 do wyznaczenia wartości napięcia trwałej pracy, utrzymano SVL w obszarze stabilności cieplnej. W sytuacji wyznaczenia parametru napięcia trwałej pracy, wyłącznie jako wartości większej niż obliczone napięcie indukowane w układzie, temperatura końcowa znajduje się poniżej temperatury dopuszczalnej, ale przy założeniu temperatury otoczenia wynoszącej 20°C . Jeżeli ogranicznik byłby narażony na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, jego początkowa temperatura mogłaby sięgnąć 45°C , przy takim warunku i przepływie prądu zwarciovego udarowego, doszłoby do przekroczenia maksymalnej zalecanej temperatury pracy SVL i potencjalnie negatywnego wpływu na jego trwałość. W ostatnim przykładzie SVL jest bliski osiągnięcia temperatury krytycznej, a w konsekwencji może ulec uszkodzeniu.

Tabela 7.8. Zestawienie obliczonych wartości wydzielonej energii na SVL i wzrostu temperatury

| U_r [kV] | U_c [kV] | E [kJ] | ΔT [$^{\circ}\text{C}$] | T_k [$^{\circ}\text{C}$] |
|------------|------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 2,3 | 1,8 | 3,6 | 44 | 64 |
| 2,0 | 1,6 | 5,5 | 64 | 84 |
| 1,7 | 1,3 | 13,0 | 156 | 180 |

7.5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę warunki pracy beziskiernikowych ograniczników przepięć SVL najistotniejszą kwestię stanowi precyzyjne określenie wartości napięcia trwałej pracy, a jest to wynik poprawnego obliczenia napięć indukowanych w układzie w związku z przepływem prądu zwarciovego analizowaną linią kablową. Podsumowując wyniki analiz i obliczeń, bardzo złożonych, rzeczywistych układów, zaproponowanych w rozprawie, to na podstawie dostępnych metod w podstawowym zakresie, wyniki te można określić jako zbliżone. Niemniej jednak w zależności od konfiguracji układu metody analityczne, które powinny poprzez pewne założenia upraszczające, dawać rezultaty zawierające bufor bezpieczeństwa, tj. wyższe wartości napięć indukowanych niż wynikałoby to z precyzyjnych obliczeń, niestety tych założeń nie spełniają, jak zostało to wykazane

w rozdziale 7. Poniżej przedstawione zostały zidentyfikowane przez autora możliwe przyczyny tego stanu rzeczy.

Przeprowadzając obliczenia z wykorzystaniem modelu jednofazowego i wyprowadzonych wzorów uproszczonych dla wybranych układów, tak jak zostało to wykonane w rozprawie i szczegółowo przedstawione w załącznikach A.1 oraz B.1, należy w szczególności zwrócić uwagę na prawidłowe określenie wartości wypadkowej rezystancji systemu uzemień na początku i końcu analizowanej linii kablowej. Wartość ta jest podstawą do wyznaczenia sumarycznej wielkości prądu uziomowego oraz wartości wzrostu lokalnego potencjału ziemi w sytuacji analizy zwarcia jednofazowego. Wpływa to w zasadniczym stopniu na wartość napięcia odkładającego się na zaciskach ograniczników przepięć. We wzorze na wyznaczenie straty napięcia na żyłę powrotnej kabla w układzie CB widnieje wielkość I_g , co do której w zależności od układu występuje problem w interpretacji fizycznej. Wartość I_g jest niezbędna do wyznaczenia wartości prądu płynącego w zastępczym przewodzie powrotnym utworzonym przez 3 ekrany kabli (w badanym układzie występuje ich 6, co również ma wpływ na wyniki obliczeń). Wzór na stratę napięcia na żyłę powrotnej zakłada, że układ jest jednostronnie zasilony, w przypadku uwzględnienia rzeczywistego rozptyłu prądu zwarciovego wyniki otrzymane z tej zależności są błędne.

Metoda obliczeń przy pomocy modelu jednofazowego nie pozwala, dla układu CB, na zidentyfikowanie oddziaływania drugiego toru linii kablowej (dla linii typu syfon obecność drugiego toru linii kablowej znacznie obniża napięcie indukowane na SVL), jak również nie ma możliwości uwzględnienia dodatkowego kabla ECC przy zastosowaniu układu krzyżowania żył powrotnych.

Drugim ważnym aspektem w modelu jednofazowym jest fakt, że impedancje kilometryczne własne i wzajemne liczone na podstawie równań Carsona/Polaczka nie uwzględniają rezystancji uzemień poszczególnych słupów linii napowietrznych / sekcji linii kablowych, co w efekcie wpływa na wartość współczynnika redukcyjnego uniezależniając jego wartość od rezystancji uzemień, co nie jest prawdą, a wpływa w znaczącym stopniu na wartość prądu płynącego obwodem ziemnopowrotnym.

Podobnie jak wskazano w monografii [96], zawarte w rozprawie wyniki obliczeń wartości prądów w przewodach odgromowych w części przeseł, jak i wartości prądów płynących w części uziomów, a także wartości prądów płynących w ekranach metalicznych kabli uzyskane w modelu jednofazowym różnią się od wyników wieloprzewodowych tj. dla symulacji wykonanych w ATP-EMTP. Największe różnice można zaobserwować podczas analizy układów w pobliżu stacji elektroenergetycznych. Jest to przede wszystkim związane z faktem, że w modelu jednofazowym zastępcze źródło prądu zwarciovego jest połączone bezpośrednio z ziemią odniesienia, natomiast w ATP-EMTP, punkt neutralny źródła trójfazowego jest połączony z rezystancją modelującą uziom stacji. W metodach uproszczonych przez rezystancję uzimienia stacji płynie całkowity prąd płynący żyłami powrotnymi / przewodami odgromowymi, natomiast EMTP uwzględnia szczegółowy rozptył prądu zwarcia, co powoduje, że obliczony wzrost potencjału uziomu jest różny.

Macierzowy Model Wielofazowy – CIM, odwzorowuje prawidłowo oddziaływania poszczególnych torów prądowych na siebie i umożliwia modelowanie również skomplikowanych wielotorowych układów włącznie z uwzględnieniem kabli ECC, ale w odniesieniu do jednej sekcji linii kablowej, jako wartości prądów i napięć przeliczone na jednostkę długości. Zaznaczenia wymaga fakt, że obliczenia zakładają zasilanie jednostronne, nie ma możliwości uwzględnienia rozplywu prądu zwarcia. Aby móc odnieść otrzymane wyniki do danego obiektu, zwłaszcza w kontekście analizy EPR i wpływu na napięcie indukowane na SVL, wymagane są dodatkowe przekształcenia i ostrożność w modelowaniu obwodu ziemnopowrotnego. Nie jest jasne dlaczego w przypadku wyznaczenia warunków obwodu ziemnopowrotnego w odmienny sposób należy podchodzić do analizy układów typu syfon, tj. jak ma to miejsce w układzie 1 – do obliczeń przyjęto wypadkową wartość systemu uziemień widzianą od strony początku i końca linii kablowej. Natomiast w przypadku układu 2, istnieje konieczność przyjęcia wyłącznie rezystancji uziemienia słupa kablowego na końcu linii kablowej, aby w prawidłowy sposób odwzorować EPR. W dostępnej literaturze nie ma precyzyjnego opisu wytycznych budowy modelu wielotorowej linii przy pomocy metody CIM, co stanowić może potencjalny problem dla inżyniera, który z tej metody chciałby skorzystać. Dodatkowo utworzenie modelu matematycznego jest czasochłonne i bardzo złożone. Metoda CIM wymaga bardzo dobrego zrozumienia opisu fizycznego zjawiska, aby poprawnie zbudować model matematyczny, ale obliczenia wykonane tą metodą dają wyniki pozwalające na oszacowanie potencjalnych problemów ze wzrostem potencjału ziemi.

Obie metody analityczne opisane powyżej i wykorzystane w rozprawie zakładają, że podczas analizy rozplywu prądu zwarcia jednofazowego oraz dwufazowego z ziemią (dla metody CIM), przy wyznaczeniu spadku napięcia na żyłę powrotnej, w celu obliczenia napięcia indukowanego na SVL, na prawidłowe zgodne z interpretacją fizyczną przyjęcie kierunków przepływu prądu i zwrotów napięć, tj. wyznaczenie napięcia odkładającego się na zaciskach SVL jako różnicy napięcia uziomowego i wypadkowej indukowanej w żyłę powrotnej siły elektromotorycznej. Zalecenia widniejące w literaturze, przede wszystkim w opracowaniach CIGRE [47, 161, 168] wskazują na konieczność przyjęcia odmiennego podejścia, tj. wyznaczenia sumy wartości indukowanej siły elektromotorycznej i wartości EPR jako napięcia, które odłoży się na zaciskach SVL. Jest to związane z koniecznością wprowadzenia dodatkowego marginesu bezpieczeństwa, aby uniknąć sytuacji jaką opisano w rozprawie w rozdziale 7 dla układu 2, czyli niedoszacowania wartości napięcia trwałej pracy ogranicznika przepięć. To, zdaniem autora jest uzasadnione i wynika bezpośrednio z otrzymanych w analizowanych przykładach niedoszacowanych wartości napięć indukowanych i może stanowić element zmiany założeń opisanych w rozprawie w rozdziale 6.2, a tym samym powinno również być uwzględnione w wytycznych PSE [35].

Przykłady literaturowe wskazują dobrą dokładność metod analitycznych dla linii kablowych, których wypadkowa impedancja systemu uziemień na początku i na końcu linii kablowej, a także rezystancja uziemienia poszczególnych sekcji jest nie większa od 1Ω , wtedy zaciera się różnica interpretacyjna w zakresie prądu płynącego obwodem ziemnopowrotnym, o której wspomniano powyżej w posumowaniu. Jest to możliwe wyłącznie prowadząc linię w terenie mocno zurbanizowanym oraz zakładając połączenie dwóch stacji analizowaną linią kablową. Tego typu przykłady opisano w m.in. następujących pozycjach literaturowych [47, 168]. Z tego względu, bazując na opracowanych przez autora w rozprawie wynikach analiz i obliczeń, przy wartościach

rezystancji uziemienia wyższych niż 1Ω , konieczne jest wykonanie bardziej dogłębnych sprawdzeń analizowanego układu linii kablowej przy pomocy modelowania w oprogramowaniu typu EMTP, jako weryfikację wstępnych wyników otrzymanych według metod analitycznych.

Zarówno w przypadku CIM, jak i przy modelu jednofazowym nie są brane pod uwagę szczegółowe rozkłady prądów zwarciovych jak również szczegółowa reprezentacja rzeczywistej wypadkowej rezystancji uziemienia. Zakłada się przepływ całości prądu zwarciovego przez żyły powrotne kabli oraz to, że wszystkie wartości prądów fazowych są znane. Ponadto dla układu CB przyjmuje się jednakową długość odcinków w sekcji, a odległości pomiędzy kablami przez całą długość analizowanej linii są stałe.

Bardziej atrakcyjną, w porównaniu do CIM, metodą obliczeń biorącą pod uwagę wartości rezystancji uziemienia poszczególnych słupów na linii, czy też miejsc uziemienia sekcji linii kablowych mogłaby być odpowiednio dostosowana metoda potencjałów węzłowych lub też dopasowana do obliczeń linii kablowych metoda Tablou [96]. Jest to potencjalny obszar rozwinięcia badań zapoczątkowanych w niniejszej pracy tj. opracowania nowych metod analitycznych w celu weryfikacji stanów pracy linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych.

Prawidłowo skonfigurowany w oprogramowaniu ATP-EMTP model cyfrowy linii kablowej pozwala zweryfikować wszystkie wykonane metodami analitycznymi zakresy obliczeń i daje pewność poprawnej weryfikacji badanego układu. Dodatkowo umożliwia pogłębienie wiedzy o zjawiskach występujących w analizowanym systemie, które nie są możliwe do wyznaczenia w sposób uproszczony. W zależności od przyjętych warunków i szczegółowości zamodelowanego elementu systemu, analizy wykonane w oprogramowaniu ATP-EMTP pozwalają na precyzyjne wyznaczenie przebiegu wartości chwilowej prądów i napięć w stanach nieustalonych, co pozwala, poprzez zastosowanie dodatkowych narzędzi, na obliczenie niedostępnych innymi metodami zależności, takich jak wyznaczenie energii rozpraszanej na ograniczniku, czy też wzrostu jego temperatury. Procedura ta pozwala również na elastyczne i szybkie szukanie rozwiązań zamiennych poprzez szybkość budowy modelu, oraz kompleksowe podejście do oddziaływań wzajemnych pomiędzy poszczególnymi elementami badanego układu. Natomiast bardzo ważnym elementem jest pewność poprawnego wykonania modelu komputerowego i poprawność przeprowadzonych symulacji komputerowych. Bazując wyłącznie na wynikach symulacji, nie ma możliwości weryfikacji potencjalnych błędów w opracowanym modelu, stąd wg autora niezbędnym jest wstępnie wykonanie obliczeń metodami analitycznym, a następnie przeprowadzenie weryfikacji szczegółowej wykonanej z pomocą oprogramowania typu EMTP. Tak poprowadzone obliczenia umożliwiają weryfikację i dają pewność „inżynierską” co do istoty zagadnienia.

8. Wnioski

Autor niniejszej rozprawy wykazał, że w procedurze określania warunków pracy beziskiernikowych ograniczników przepięć SVL konieczne jest uwzględnienie wartości chwilowych napięć indukowanych w metalowych ekranach kabli 110 kV, a także określenie wpływu wartości składowej nieokresowej prądu zwarciovego. Na tej podstawie zaproponowany został autorski proces doboru parametrów ograniczników przepięć, którego szczegółowy opis zawiera rozdział 5 rozprawy. W rozdziale 6 opisano kompleksową procedurę wyboru konkretnego ogranicznika przepięć pracującego jako SVL w oparciu o przeprowadzone przez autora obliczenia i wyniki symulacji. Zdaniem autora przedstawione w rozdziale 7 wyniki badań oraz wnioski z nich wyciągnięte pozwalają na stwierdzenie, że teza postawiona w rozdziale 2 została udowodniona.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz zaprezentowanych w rozdziale 7 autor przedstawił ograniczenia powszechnie wykorzystywanych analitycznych metod obliczeniowych pozwalających na wyznaczenie napięć indukowanych w powłokach kabli i ich potencjalny wpływ na błędne wymiarowanie urządzeń, które stanowią podstawę niezawodności pracy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych, tj. poprawność doboru parametrów elektrycznych ograniczników przepięć SVL.

W ramach niniejszej pracy doktorskiej autor zweryfikował i uzupełnił stosowane dotychczas metody analityczne dotyczące obliczeń napięć indukowanych linii kablowych zaprojektowanych w układzie CB, w tym obliczenia przy pomocy modelu jednofazowego oraz macierzowego modelu wielofazowego (CIM). Metody uzupełniono o propozycję opisu matematycznego obwodu ziemnopowrotnego w konfiguracjach stanowiących największą trudność inżynierską – skablowanie linii napowietrznej, z powodu braku dostępnych w literaturze wytycznych. Ten obszar jest kluczowy pod względem analizy wzrostu lokalnego potencjału ziemi, a jego prawidłowe wyznaczenie jest krytyczne w odniesieniu do bezpieczeństwa pracy systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych.

Autor w podsumowaniu rozdziału 7 wskazuje również propozycję dodatkowych przyszłych badań, w celu opracowania nowych metod, które mogłyby być pozbawione wad i ograniczeń w odniesieniu do modelowania obwodu ziemnopowrotnego linii kablowych z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych.

Ponadto w ramach opracowanego procesu doboru parametrów SVL, jako podstawowego elementu analizy przepięć w powłokach kabli 110 kV w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych, autor opracował precyzyjne wytyczne, które są niezbędne do modelowania i analizy systemów kablowych. Wytyczne te prowadzą do wyznaczenia, z zastosowaniem technik komputerowych, wartości spodziewanych maksymalnych przepięć dorywczych, stanowiących podstawę doboru urządzeń do ochrony powłok/osłon i jednocześnie przekładek izolacyjnych muf separacyjnych kabli 110 kV. Autorską analizę optymalnego wyboru modeli poszczególnych elementów systemu kablowego do przeprowadzenia symulacji, zawarto w rozdziale 6.3 rozprawy.

Opisane w rozprawie zagadnienia dotyczące budowy i konfiguracji modelu cyfrowego systemu kablowego stanowią podstawę metodologii wykonywania dogłębnych analiz zjawisk zachodzących podczas pracy linii kablowych, z zastosowanym specjalnym uziemieniem żył powrotnych, na etapie

projektowania, analizy istniejących obiektów pod względem identyfikacji zagrożeń, a także jako procedura audytu poawaryjnego. Wiele opisanych w rozprawie obszarów może stanowić bazę do rozszerzenia wiedzy o inne aspekty dotyczące np. z analizy wpływu linii kablowych na sieć, do której są przyłączane, z dogłębną analizą kompensacji mocy biernej pojemnościowej, czy być może z dobozem parametrów aparatury łączeniowej. Zagadnienia opracowane w niniejszej pracy mogą, zdaniem autora, zostać adaptowane z niewielkim uzupełnieniem do analizy systemów kablowych najwyższych napięć, tj. linii kablowych pracujących w systemie o napięciu znamionowym 220 kV i 400 kV.

W zakresie samych ograniczników przepięć pracujących jako SVL, jako uzupełnienie zagadnień poruszonych w rozprawie, autor proponuje, wykonanie dodatkowych badań odporności ograniczników przepięć na przyłożenie napięcia stałego i określenie warunków przeprowadzenia pomiarów, aby umożliwić wykonywanie badań szczelności powłoki linii kablowej bez konieczności odłączenia SVL, co znacznie by uprościło niektóre czynności eksploatacyjne.

Literatura

- [1] Alexandrou K., Tastavridis C., Georgallis G., Anders G. J., Sheath circulating currents calculation in asymmetrical installation schemes for power frequency models, CIGRE Session, B1-110, Paris, France, August, 2018.
- [2] Ali S. A., Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 11, 6, s. 433-432.
- [3] Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book – Electronic Edition in PDF Format, 3 ed., Buenos Aires, Argentina, 2001.
- [4] Ametani A., The History and Recent Trends of Transient Analysis in Transmission Lines, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) in Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.
- [5] Ametani A., Lightning Surge Analysis by EMTP and Numerical Electromagnetic Analysis Method, the 30th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2010, Cagliari, Italy, September 13-17, 2010.
- [6] Ametani A., Lafaia I., Mahseredjian J., Review of Underground Cable Impedance and Admittance Formulas, the 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15, Paris-Versailles, June 21-25, 2015.
- [7] Ametani A., Nagaoka N., Noda T., Matura T. A Simple and Efficient Method for Including a Frequency-Dependent Effect in a Transmission Line Transient Analysis, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95), Lisbon, Portugal, September 3-7, 1995, s. 11-16.
- [8] Ametani A., Ohno T., Nagaoka N. Cable System Transients Theory, Modeling and Simulation, 1 ed., Singapore, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015.
- [9] Ametani A., Wan C. T., Sheath Overvoltages Due to Faults on an EHV cable, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95), Lisbon, Portugal, September 3-7, 1995, s. 87-92.
- [10] Application Guide for Cable – Sheath Bonding for the Control of Earth Potential Rise and for the Limitation of Hazardous Induction into Telecommunication Circuits. The New Zealand Committee for the Co-ordination of Power and Telecommunication Systems Inc. (NZCCPTS), 1999.
- [11] Bak C. L., EHV/HV Underground Cable Systems for Power Transmission, praca doktorska, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2015 (maszynopis).
- [12] Ball E. H., Occhini E., Luoni G. Sheath Overvoltages in High-Voltage Cables Resulting from Special Sheath-Bonding Connections, *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems*, 1965, PAS-84, 10, s. 974-988.
- [13] Bayadi A., Harid N., Zehar K., Belkhiat S., Simulation of Metal Oxide Surge Arrester Dynamic Behavior Under Fast Transients, the International Conference on Power Systems Transients - IPST 2003, New Orleans, USA, September 28 - October 2, 2003.
- [14] Benato R., Multiconductor Analysis of Underground Power Transmission Systems: EHV AC Cables, *Electric Power Systems Research*, 2009, 79, s. 27-38.
- [15] Benato R., Dambone Sessa S., Guglielmi F., Partal E., Tleis N., Ground Return Current Behavior in High Voltage Alternating Current Insulated Cables, *Energies*, 2014, 7, s. 8116-8131.
- [16] Benato R., Paolucci A., EHV AC Undergrounding Electrical Power - Performance and Planning, Springer-Verlag, UK, London, 2010.
- [17] Bickford J. P., Mullineux N., Reed J. R., Computation of Power System Transients, 1 ed., London and New York, The Institution of Electrical Engineers, 1980.
- [18] Boryń H., Wojtas S., Prądy indukowane w metalowych powłokach kabli średniego napięcia, *Automatyka-Elektryka-Zakłócenia*, 2012, 7, s. 56-61.

- [19] Brakelmann H., Dong T., Compensation Conductor for Expanded Application of Cross-Bonding for High Voltage Cable Systems, EEUG10, the European EMTP-ATP Conference, Espoo Otaniemi, Finland, 2010.
- [20] Brakelmann H., Dong T., Waschk V., High Voltage Cables With a Special Sheath-Bonding System, the 8th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'11, June 19-23, Paris-Versailles, France, 2011.
- [21] Bremnes J. J., Evenset G. W., Frequency Dependency of Single-Core Cable Parameters, the 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15, June 21-25, Paris-Versailles, France, 2015.
- [22] Cabau M., Mammeri M., Mirebeau P., Rouet F., Santana J., Dhuicq B., Lesur F., Tache C., Safe work on HV extruded insulation cable systems under induced voltages, CIGRE Session, B1-115, Paris, France, August, 2018.
- [23] Brookes A. S., The Design of Specially Bonded Cable Systems, CIGRE Electra No 28, 1973, SC No 21, s 55-68.
- [24] Cable system electrical characteristics, CIGRE Technical Brochure No. 531, Working Group B1.30, 2013.
- [25] Chen X., Wu K., Cheng Y., Yan L., Sheath Circulating Current Calculations and Measurements of Underground Power Cables, the 7th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'07, June 24-28, Paris-Versailles, France, 2007.
- [26] Che-Wung Ha, Woo-Sang Lim, SVL's Damage Assessment and Improvement Method for Underground Cables, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May, 2007.
- [27] Cholewicki T., Elektrotechnika teoretyczna, wyd. 2, Tom I, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 1971.
- [28] Cholewicki T., Elektrotechnika teoretyczna, wyd. 2, Tom II, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 1971.
- [29] Chowdhuri P., Power System Transients, in: The Electric Power Engineering Handbook, Ed. Grigsby L.L., Boca Raton, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2001.
- [30] Christodoulou C. A., Ekonomou L., Mitropoulou A. D., Vita V., Stathopoulos I.A. Surge Arresters' Circuit Models Review and their Application to a Hellenic 150 kV Transmission Line, Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18, s. 836–849.
- [31] Colla L., Gatta F. M., Geri A., Lauria S., Lightning Overvoltages in HV-EHV "Mixed" Overhead-Cable Lines, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.
- [32] Connection of Earthing Circuits in High Voltage Systems, ICAT 2005, CO/VAR/PRO/ICA/080/022, General Cable, 2005.
- [33] Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z., Calculation of Induced Sheath Voltages in Power Cables – Single Circuit System Versus Double Circuit System, Journal of Information, Control and Management Systems, 2014, 12, 2, s. 113-124.
- [34] Denz F. S., Modeling and Simulation of Varistors, praca doktorska, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, der Technischen Universität Darmstadt, Deutschland, 2014 (maszynopis).
- [35] Wytuczne projektowe dla doboru ograniczników przepięć instalowanych na żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych – wskazówki dla projektantów, PSE-WP. Dobór ograniczników_żyła_powrotna_wskazówki/2020, Standardy sieci przesyłowej (Linie kablowe na stacji), 2020.
- [36] Dommel H. W., Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, NO. 4, APRIL 1969.
- [37] Dommel H. W., Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book), 1 ed., Portland, Bonneville Power Administration, 1986.
- [38] Dubois D., Mirebeau P., Streit P., Liemans D., Mammeri M., Michon F., Nguyen Tuan M., Barralon A., Evolution in method and performance for bonding the metal screen of UG HV power cable, Jicable'11, June 19-23, Paris-Versailles, France, 2011.

- [39] Duda D., Parametry ograniczników przepięć stosowanych do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN, *Energetyka*, 2018, sierpień, s. 425-429.
- [40] Duda D. Rozpliw prądu zwarcia 1-fazowego, a dobór ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, 94, 10, s. 57-60.
- [41] Duda D., Gacek Z.: Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych i ochrona przed przepięciami, wyd. 1, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015.
- [42] Duda D., Szadkowski M., Dobór ograniczników przepięć do ochrony osłon zewnętrznych kabli wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, 92, 10, s. 112-115.
- [43] Duda D., Szadkowski M., Ochrona przeciwprzepięciowa osłon kabli WN w różnych układach połączeń żył powrotnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, 90, 10, s. 37-40.
- [44] Duda D., Szadkowski M., Kable ECC w układzie SPB kabli wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, 92, 10, s. 104-107.
- [45] Duda D., Szadkowski M., Żmuda K., Aktualne problemy projektowania i eksploatacji linii kablowych 110 kV (głównie miejskich), *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2014, 4, s. 22-26.
- [46] Durbak D. W., Surge Arrester Modeling, 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, Ohio, USA, 28 January-1 February, 2001, s. 728-730.
- [47] Earth potential rises in specially bonded screen systems, Working Group B1.26, CIGRE Technical Brochure 347, 2008.
- [48] Earth potential rises in specially bonded screen systems, Working Group B1.26, *Electra*, 2008, 238, June, s. 35-45.
- [49] Ermel M., Henschel M., Field Measurements and Modelling of the Transients Propagation Properties of a 380kV Cable System Of 7.5 km Length at Bewag Berlin, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95), Lisbon, Portugal, September 3-7, 1995, s. 82-86.
- [50] Ermel M., Pannicke J., Henschel M., Field Measurements and Calculation of Electromagnetic Transients due to Faults in a Cross-Bonded 400 kV Cable System, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'97), Seattle, USA, June 22-26, 1997, s. 269-274.
- [51] Fekete K., Nikolovski S., Knezević G., Stojkov M., Kovač Z., Simulation of Lightning Transients on 110 kV Overhead-Cable Transmission Line using ATP-EMTP, the MELECON 2010 - 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valletta, Malta, 2010, s. 856-861.
- [52] Fessol F. N., Mohd Ariffin A., Illias H. A., Influence of Underground Cable Insulation Parameters on Transient Overvoltages, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013), Langkawi, Malaysia, June 3-4, 2013.
- [53] Filipovic-Grcic B., Uglešić I., Milardic V., Xemard A., Guerrier A., Energy Stress of Surge Arresters due to Temporary Overvoltages, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2011), Delft, the Netherlands, June 14-17, 2011.
- [54] Florkowski M., Orazmus P., Comparison of surge arresters models to overvoltages studies in electrical networks, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 36, 2013.
- [55] Fortin S., Ruan W., Comparisons of Low-Frequency and High Frequency Grounding Software Package Capabilities, *Safe Engineering Services & technologies*, 2005.
- [56] Furgal J., Dau S. K. O., Modelling of Metal Oxide Surge Arresters as Elements of Overvoltage Protection Systems, *Elektrotechnika i Elektronika*, 2008, Tom 27, Zeszyt 1, s. 14-19.
- [57] Garnacho F., Khamlichi A., Simon P., González A., Guide to Sheath Bonding Design, in *Distribution and Transmission Lines with HV Underground Cables*, CIGRE Session, B1-105, Paris, France, August, 2012.
- [58] Garnacho F., Khamlichi A., Valero A., Guide to EHV/HV cable sheath bonding application software, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 2015.
- [59] Ghassemi F., Effect of Trapped Charges on Cable SVL Failure, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.
- [60] Ghassemi F., Haigh P., Investigation into Oversheath Failure of a 275 kV Cable, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, July 15-18, 2015.

- [61] Gouramanis K. V., Kaloudas Ch. G., Papadopoulos T. A., Papagiannis G. K., Stasinou K., Sheath Voltage Calculations in Long Medium Voltage Power Cables, PowerTech, 2011 IEEE, Trondheim, Norway, June 19-23, 2011.
- [62] Grcev L., Arnautovski V., Electromagnetic Transients in Large and Complex Grounding Systems, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'99), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999, s. 341-345.
- [63] Gudmundsdottir U. S., Modelling of long High Voltage AC Cables in the Transmission System, praca doktorska, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2010 (maszynopis).
- [64] Gudmundsdottir U. S., Proximity Effect in Fast Transient Simulations of an Underground Transmission Cable, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.
- [65] Gudmundsdottir U. S., Bak C. L., Wiechowski W. T., Modeling of long High Voltage AC Underground Cables, the PhD Seminar on Detailed Modelling and Validation of Electrical Components and Systems 2010 in Fredericia, Denmark, February 8th, 2010.
- [66] Gudmundsdottir U. S., Bak C. L., Wiechowski W. T., Søgaard K., Knardrupgård M. R., Measurements for Validation of high Voltage Underground Cable Modelling, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- [67] Gudmundsdottir U. S., Silva J. De, Bak C. L., Wiechowski W., Double Layered Sheath in Accurate HV XLPE Cable Modeling, Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Minneapolis, USA, July 25-29, 2010.
- [68] Guide to the Protection of Specially Bonded Cable Systems Against Sheath Overvoltage, Working Group 07, Study Committee no.21, Electra No.128, 1990.
- [69] Guidelines for safe work on cable systems under induced voltages or current, WG B1.44, 2019
- [70] Gustavsen B., Panel Session on Data for Modeling System Transients Insulated Cables, 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, Ohio, USA, 28 January-1 February, 2001, s. 718-723 vol. 2..
- [71] Hasheminezhad M., Vakilian M., Direct Introduction of Semicon Layers in a Cable Model, 2008, Scientia Iranica, 15, 2, s. 203-210.
- [72] Henriksen T., Gustavsen B., Balog G., U. Baur, Maximum Lightning Overvoltage Along a Cable Protected By Surge Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20, 2, s. 859-866.
- [73] Hileman A. R., Insulation Coordination for Power systems, 1 ed., New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 1999.
- [74] Hinrichsen V., Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems - Fundamentals, 3 ed., Berlin, Siemens AG, 2011.
- [75] Hoidalen H. K., Soloot A. H., Cable Modelling in ATP – From Noda To Type94, EEUG Meeting 2010, European EMTP-ATP Conference, Helsinki, Finland, August 17th, 2010.
- [76] Hong-Chan Ch., Fu-Hsien Ch., Cheng-Chien K., Tai-Hsiang Ch., A Study of Lightning Surge on Underground Cables in a Cable Connection Station, the 6th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits & Systems, Hangzhou, China, April 15-17, 2007, s. 198-203.
- [77] Hoogendorp G., Steady State and transient behavior of underground cables in 380 kV transmission grids, praca doktorska, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics & Computer Science, Delft University of Technology, The Netherlands, 2016, (maszynopis).
- [78] 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.
- [79] IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents.
- [80] IEC TR 60909-1:2002 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0.
- [81] IEC TR 60909-2:2008 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations
- [82] IEC 60909-3:2009 Short-circuit currents in three-phase AC systems - Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth.

- [83] IEC TR 60909-4:2000 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents.
- [84] IEEE 1313-1993 - IEEE Standard for Power Systems - Insulation Coordination.
- [85] IEEE Std 575™-2014 IEEE Guide For Bonding Shields And Sheaths Of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV Through 500 kV.
- [86] IEEE Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [87] Imai T., Watanabe Y., Calculation of Traveling Waves on Single-Conductor Cable Circuit with Cross-Bonding, IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, 1968, PAS-87, 6, s. 1507-1514.
- [88] Implementation of long AC HV and EHV cable systems, Working Group B1.47, CIGRE Technical Brochure 680, 2017.
- [89] Insulation co-ordination for HV AC underground cable system, Working Group 21/33, CIGRE Technical Brochure 189, 2001.
- [90] Jabłoński W., Wytyczne projektowania i budowy uziemień i ochrony przeciwporażeniowej w stacjach elektroenergetycznych o górnym napięciu 110 - 400 kV Część I - Wytyczne ogólne i obliczenia, Kraków, WKR 91/01, Tom X-95195, Energoprojekt Kraków, 1991.
- [91] Kacejko P., Machowski J., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, wyd. 3, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 2020.
- [92] Kawamura K., Ametani A., Gudmundsdottir U. S., Surge Analysis on a Long Underground Cable System, Journal of International Council on Electrical Engineering, 2013, 3, 2, s.158-163.
- [93] Khamlichi A., Denche G., Garnacho F., Donoso G., Valero A., Location of sheath voltage limiters (SVLs) used for accessory protection to assure the insulation coordination of cable, CIGRE Session, B1-108, Paris, France, August, 2016.
- [94] Kizilcay M., Switching Overvoltages in a 400-kV Cable System, the 16th Power Systems Computation Conference (PSCC), Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008.
- [95] Kizilcay M., Neumann C., Lightning Overvoltage Analysis of a 380-kV Overhead Line with a GIL Section, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, July 15-18, 2015.
- [96] Klucznik J., Obliczanie wartości prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2017.
- [97] Krakowski M., Obwody ziemnopowrotne, wyd. 1, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, 1979.
- [98] Krakowski M., Elektrotechnika Teoretyczna, wyd. 5, Warszawa, Państwowe Wydawnictwa Naukowe PWN, 1995.
- [99] KRT-035, Album elementów linii kV na słupach stalowych S24, PBE Energoprojekt, Warszawa, 1972.
- [100] KRT-075, Album elementów linii kV na zunifikowanych słupach stalowych B2, Biuro Studiów i Projektów Energetycznych, Kraków, 1977.
- [101] Lafaia I., Yamamoto Y., Ametani A., Mahseredjian J., Correia de Barros M. T., Koçar I., Naud A., Propagation of Intersheath Modes on Underground Cables, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, July 15-18, 2015.
- [102] Leanos O. R., Wideband line/cable models for real-time and off-line simulations of electromagnetic transients, Département de Génie Électrique, École Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Canada, 2013, (maszynopis).
- [103] Lee J. B., Jung Ch. K., Technical Review on Parallel Ground Continuity Conductor of Underground Cable Systems, Journal of International Council on Electrical Engineering, 2012, 2, 3, s. 250-256.
- [104] 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.
- [105] Lighting Protection, ed. Cooray V., 1 ed., London, UK, The Institution of Engineering and Technology (IET), 2010.
- [106] Lira G. R. S., Fernandes Jr. D., Costa E. G., Computation of Energy Absorption and Residual Voltage in Metal Oxide Surge Arrester from Digital Models and Lab Tests: a Comparative Study, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.

- [107] Lira G. R. S., Fernandes Jr. D., Costa E. G., Parameter Identification Technique for a Dynamic Metal-oxide Surge Arrester Model, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- [108] Luo J., Zhou Z., Luo M., Optimizing Design of Over-Voltage Protector for HV Power Cable Metallic Shield Grounding, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, USA, April 21-24, 2008.
- [109] Mackow A., Kizilcay M., Transient Studies of Power Cable Sections in 380-kV Transmission System, the 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15, Paris-Versailles, June 21-25, 2015.
- [110] Magro M. C., Giannettoni M., Pinceti P., Validation of ZnO Surge Arresters Model for Overvoltage Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19, 4, s. 1692-1695.
- [111] Maintenance for HV cables and accessories, CIGRE Technical Brochure No. 279, Working Group B1.04, 2005.
- [112] Mangione S., Compact Model of a Combined Overhead-Cable Line for Ground Fault Application Transfer Analysis, 5th WSEAS International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, Corfu, Greece, August 23-25, 2005, s. 251-256.
- [113] Markiewicz H., Klajn A., Application Note, Earthing Systems - Fundamentals of Calculation and Design, www.leonardo-energy.org, Cu0120, European Copper Institute, 2014.
- [114] Martí L., Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency – Dependent Modal Transformation Matrices, IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3, 3, s.1099-1110.
- [115] Martí L., Simulation of Electromagnetic Transients in Underground Cables using the EMTP, the 2nd IEE International Conference On Advances in Power System Control, Operating and Management, Hong Kong, China, 1993.
- [116] Martí L. , Brierley R. H. , Grainger T. E., Analysis of Electromagnetic Transients in Cross-Bonded Cable Systems using Frequency Dependent Cable Models, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95), Lisbon, Portugal, September 3-7, 1995, s. 5-10.
- [117] Martí L., Grainger T. E., Morched A .S., Sheath overvoltages in HV underground cables, CIGRÉ: 33-201, 1996.
- [118] Mashio S., Bucea G., Long AC Underground Power Cables Safety Considerations For Application of Special Bonding Systems, CIGRE - Asia Oceana Regional Council (AORC) Technical Meeting, Tokyo, Japan, B1-1097, 2014.
- [119] Matuszak M., Szuchnik K., Koltun M., Ratkowski F., Bonczkowska A., Zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych w liniach kablowych SN, Wiadomości Elektrotechniczne, 87, 5, 2019, s. 26-30.
- [120] Meister A., Shayani R. A., Oliveira M. A. G. de, Comparison of Metal Oxide Surge Arrester Models on Overvoltage Studies, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2011, 3, 11, s. 35-45.
- [121] Metal oxide arresters in ac systems, CIGRE Technical Brochure No. 60, Working Group 06/33, 1991.
- [122] Metal oxide surge arresters in AC systems Part IV: Stresses in metal oxide surge arresters due to temporary harmonic overvoltages, Electra, 130, 1990.
- [123] Metal Oxide Surge Arresters, Selection and Application in Medium Voltage Power Systems, Tyco Electronics Guide, 2008.
- [124] Michalik M., Rosołowski E., Simulation and Analysis of Power System Transients, 2010
- [125] Modeling of Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Working Group 3.4.11 - Surge Protective Devices Committee, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7, 1, s. 302- 309.
- [126] N SEP-E-004 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa, 2014.
- [127] Nafar M., Solookinejad G., Jabbari M., Comparison of IEEE and Pinceti Models of Surge Arresters, Research Journal of Engineering Sciences, 2014, 3(5), s. 32-34.
- [128] Nichols P., Woodhouse D., Yarnold J., The Effects of Earth Potential Rise on Surge Arrester Specification in Specially Bonded Cable Systems, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08), Sydney, New South Wales, December 14-17, 2008.

- [129] Nishiwaki S., Koshizuka T., Hosokawa O., Yamamoto K., Comparison between Measurement and ATP Computation on Traveling Wave Propagation Characteristics of Long Power Cable, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- [130] Niu H., Zhou X., Zhang Y., Wang X., Shi Y., Xu Y., Parameter Analysis and Research on Sheath Lightning Overvoltage of Single-core Cable, Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009, Asia-Pacific, Wuhan, China, 2009.
- [131] Ograniczniki przepięć do ochrony osłon kabli elektroenergetycznych, PSE-ST.Ograniczniki_żyłą_powrotna/2015, Standardy sieci przesyłowej (Linie kablowe na stacji), 2015.
- [132] Ohno T., Dynamic Study on The 400 kV 60 km Kyndbyværket – Asnæsværket Line, praca doktorska, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2012 (maszynopis).
- [133] Ohno T., Ametani A., Bak C. L., Derivation of Theoretical Formulas of Sequence Currents on Underground Cable System, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2011), Delft, the Netherlands, June 14-17, 2011.
- [134] Ohno T., Bak C. L., Ametani A., Wiechowski W., Kjærsgaard Sørensen T., Derivation of Theoretical Formulas of the Frequency Component Contained in the Overvoltage Related to Long EHV Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27, 2, s. 866-876.
- [135] Ohno T., Bak C. L., Sørensen T. K., Ground Loop Impedance of Long EHV Cable Lines, IEEE Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 16-18, 2012.
- [136] Oramus P., Florkowski M., Simulations of Lightning Overvoltages in HV Electric Power System for Various Surge Arresters and Transmission Lines Models, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 90, 10, s. 137-140.
- [137] Orságová J., Toman P., Transient Overvoltages on Distribution Underground Cable Inserted in Overhead Line, 20th International Conference on Electricity Distribution Prague, Czech Republic, June 8-11, 2009.
- [138] Overvoltage Protection, Metal Oxide Surge Arresters in Medium Voltage Systems, Wetingen, Switzerland, 5 ed., ABB Application Guidelines, 2011.
- [139] Pagnetti A., Cable Modelling for Electromagnetic Transients in Power Systems, praca doktorska, Ingegneria Elettrotecnica, The University of Bologna, Italy, 2011/2012 (maszynopis).
- [140] Parsotam A., Fundamentals of Calculation of Earth Potential Rise in the Underground Power Distribution Cable Network, Power and Telecommunications Systems Co-ordination Conference, Melbourne, Australia, March 19th, 1997.
- [141] Phanthurat S., Rajakrom A., Panhorthong R., Setkit S., Kangtrong V., Analysis of Induced Sheath Voltages and Currents of 230 kV Oil-Filled and XLPE Underground Power Cables in The Tunnel : Case Study of Metropolitan Electricity Authority of Thailand, CIGRE Session, B1-114, Paris, France, August, 2018.
- [142] Pinceti P., Giannettoni M. A., Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14, 2, s. 393-398.
- [143] PN-E-05115:2002 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1kV
- [144] PN-EN 50522:2011 Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
- [145] PN-EN IEC 60071-2:2018-07 Koordynacja izolacji - Część 2: Wytyczne stosowania.
- [146] PN-EN 60099-5:2018-01 Ograniczniki przepięć. Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania.
- [147] PN-EN 60099-4:2015-01 Ograniczniki przepięć - Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego.
- [148] PN-HD 632 S2:2009 Kable energetyczne o izolacji wytłaczanej i ich osprzęt na napięcie znamionowe powyżej 36 kV ($U_m = 42$ kV) do 150 kV ($U_m = 170$ kV).
- [149] Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables, CIGRE Technical Brochure No. 556, 2013
- [150] Power Systems - Electric Power Engineering Handbook, ed. Grigsby L. L., 2 ed., Boca Raton, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [151] Power System Transients, Parameter Determination, ed. Martinez-Velasco J. A., 1 ed., Boca Raton, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

- [152] Prikler L., Høidalen H. K., ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual, 1 ed., Trondheim, Norway, Norwegian University of Technology, 2009.
- [153] Ramos-Leaños O., Naredo J. L., Gutierrez-Robles J. A., An Advanced Transmission Line and Cable Model in Matlab for the Simulation of Power-System Transients, in: MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 1, Vasilios N. Katsikis, Intech, 2012.
- [154] Ramos-Leaños O., Naredo J. L., Mahseredjian J., Dufour Ch., Gutiérrez-Robles J. A., Kocar I., A Wideband Line/Cable Model for Real-Time Simulations of Power System Transients, IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27, 4, s. 2211-2218.
- [155] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Elektroenergetycznych Linii Kablowych, Poznań, Polskie Towarzystwo Przesylu i Rozdziału Energii Elektrycznej, 2011.
- [156] Regt J. J. de, Hoogendorp G., Wagenaars P., Wouters P. A. A. F., Popov M., Sluis L. van der, Steennis E. F., Cross-Bonding Cable and Box Model Based on Pulse Reflection Measurement, IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9, 3, s. 268–275.
- [157] Reinhard M., Hinrichsen V., Richter B., Greuter F., Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters Part 2: Results of a Research Test Program, CIGRE Session, Paris, France, August, 2008.
- [158] Rosołowski E., Komputerowe Metody Analizy Elektromagnetycznych Stanów Przejściowych, wyd. 1, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- [159] Saengsuwan T., Thipprasert W., The Lightning Arrester Modeling using ATP-EMTP, Kasetsart J. (Nat. Sci.), 2008, 42, s. 156-164.
- [160] Savic M., Selection Of The Surge Arrester Energy Absorption Capability Relating to Lighting Overvoltages, 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, Italy, June 6-9, 2005.
- [161] Sheath Bonding Systems of AC Transmission Cables - Design, Testing, and Maintenance, CIGRE WG B1.50, Technical Brochure 797, 2020.
- [162] Shinozaki H. et al., Abnormal Voltages of a Core at Crossbonding Point, J. Tech Lab. Chugoku Electric Power Co., 1971, 39, s. 175-198.
- [163] Silva F. M. F. da, Analysis and Simulation of Electromagnetic Transients in HVAC Cable Transmission Grids, praca doktorska, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2011 (maszynopis).
- [164] Silva F. M. F. da, Bak C. L., Electromagnetic Transients in Power Cables, 1 ed., London, Springer-Verlag, 2013.
- [165] Silva, F. M. F. da, Wiechowski W., Bak, C. L., Gudmundsdottir U. S., Full Scale Test on a 100km, 150kV AC Cable, CIGRE Session, B1-301, Paris, France, August 22-27, 2010.
- [166] Silva H. M. J. S. P. De, Kariyawasam K. K. M. A., Gole A. M., Nordstrom J. E., Accurate Time Domain Simulation of Frequency Dependent Transmission Line Models for Large Time Steps, the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) in Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.
- [167] Sobral A., Moura Â., Carvalho M., Technical Implementation of Cross Bonding on Underground High Voltage Lines Projects, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 6-9, 2011.
- [168] Special Bonding Of High Voltage Power Cables, Working Group B1.18, CIGRE Technical Brochure 283, 2005.
- [169] Spoor D. J., Zhu J., Designing Underground Cable Systems to Withstand Steady State and Transient Voltages, CIGRE, Australian Panel B1 Insulated Cables, Underground Cables Seminar, Sydney, Australia, October 16-17, 2006.
- [170] Steentjes N. G. H., Pellis J., Rossum J. C. M. van, Riet M. J. M. van, Kersten W. F. J., Slim Cables, Compact Cross-Bonding and Corrected Distance Protection, CIGRE Session, B1-112, Paris, France, September, 2004.
- [171] Stenström L., Lundquist J., Selection, Dimensioning and Testing of Line Surge Arresters, CIGRE International Workshop on Line Surge Arresters and Lightning, Rio de Janeiro, Brazil, April 24-26, 1996.

- [172] Szuchnik K., Narazenia oslon/powlok kabli 110 kV od przepięć w układach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych na wprowadzeniu do stacji o dużej mocy zwarciowej – układ SPB, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, 92, 10, s. 108-111.
- [173] Szuchnik K., Koltun M., Analiza przepięć atmosferycznych w kablach 110 kV w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych i zbadanie wpływu ograniczników przepięć na poziom narażeń napięciowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, 94, 10, s. 156-163.
- [174] *The Electric Power Engineering Handbook*, ed. Grigsby L. L., 2 ed., Boca Raton, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2001.
- [175] The design of specially bonded cable circuits (Part II), *Electra*, 47, 1976.
- [176] Thule Hansen M., Schultz Pedersen K., Condition monitoring of crossbonded transmission cable systems, praca magisterska, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2012 (maszynopis).
- [177] Tleis N., *Power Systems Modelling and Fault Analysis Theory and Practice*, 1 ed., Oxford, UK, Newnes (Elsevier), 2008.
- [178] Tommasi L. De, Gustavsen B., Accurate Transmission Line Modeling Through Optimal Time Delay Identification, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.
- [179] *Transient Analysis of Power Systems Solutions, Techniques, Tools and Applications*, ed. Martinez-Velasco J. A., 1 ed., West Sussex, England, John Wiley & Sons Ltd., 2015.
- [180] Transient voltages affecting long cables, CIGRE Technical Brochure 268, 2005.
- [181] Tziouvaras D. A., Protection of High-Voltage AC Cables, 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2006.
- [182] Uribe F. A., Naredo J. L., Moreno P., Guardado L., Calculating Earth Impedances for Underground Transmission Cables, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'2001), Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001.
- [183] Vo Van Huy H., Dorison E., Sheath Overvoltages Affecting Specially Bonded Underground Links During Single-Phase Faults, the 5th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'99, Paris-Versailles, June 20-24, 1999.
- [184] Watson N., Arrillaga J., *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, 1 ed., London, UK, The Institution of Engineering and Technology (IET), 2007.
- [185] Włodarski R., Bucholz J., *Linie kablowe bardzo wysokich napięć. Projektowanie i budowa.*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1979.
- [186] Wolkowiński K., *Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych*, Wyd. 3, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1967.
- [187] Woodworth J., ArresterFacts 032 The Sheath Voltage Limiter, www.arresterworks.com, 2013.
- [188] Woodworth J., ArresterFacts 030 Modeling Temperature Rise In Arresters From Energy Absorption, www.arresterworks.com, 2011.
- [189] Woodworth J., ArresterFacts 012 Understanding The Arrester Energy Handling Issue, www.arresterworks.com, 2008.
- [190] Xemard A., Dorison E., Study of the Protection of Screen Interruption Joints against Fast-Front Over-Voltages, the International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
- [191] Xu H., Mardiana R., Su C. Q., Li C. R., Study on the Capacity of Sheath-Protecting Surge Arrester at a 230 kV Cable End, IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC), Dubai, United Arab Emirates, February 19-22, 2011.
- [192] Zhou L., Zhou Z., Ji W., Selection Research of Sheath Voltage Limiter of High-Voltage Cable, the 8th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'11, June 19-23, Paris-Versailles, France, 2011.
- [193] Żmuda K., *Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze – wybrane zagadnienia z przykładami.*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2016.
- [194] Żmuda K., Kielboń M. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych kabli 110 kV przy ich jednostronnym połączeniu i uziemieniu (układ SPB), 2014.

Katalogi producentów, specyfikacje techniczne

- [195] Instrukcja montażu głowicy kablowej ESS/ESP 123 prod. Pfisterer, nr 4.3 - 131166, rev. 0910
- [196] Karta katalogowa – wewnętrzny ogranicznik przepięć w osłonie silikonowej, PROXAR-IIW AC/KK/06/PL wydanie 01.2019
- [197] Katalog - Link Boxes, High Voltage Cable Systems, Cable Sheath Earthing, prod. Insulect
- [198] Specyfikacja techniczna – kabel NA2XS(FL)2Y 1x1200RMS/150 64/110 (123)kV prod. Demirer Kablo, nr CD-6034-3 Rev.00
- [199] Specyfikacja techniczna - kabel XRUHKXS 1x800RMC/95 64/110 (123)kV prod. TF Kable, nr Mp15291
- [200] Specyfikacja techniczna - Link Box LB.B.X.3.1.S6.E0.050 prod. Pfisterer, 26.05.2020
- [201] Specyfikacja techniczna - Mufa kablowa WN MSA_IXOSIL - EN prod. Pfisterer, nr 03/2010/Version 02EN

Załącznik zawiera obliczenia napięć indukowanych układu 1 zaprezentowanego na rysunku 7.2 wykonane w programie SMath Studio Desktop z założeniem sprowadzenia analizowanego systemu do układu jednofazowego, w tym również przy wykorzystaniu wzorów uproszczonych zaczerpniętych z [35, 47].

DANE PODSTAWOWE LINII KABLOWEJ

| | |
|--|--|
| $D_1 = 82$ | odległość między osiami kabli - ułożenie w ziemi (mm) |
| $d_p = 72,6$ | średnia średnica żyły powrotnej kabla (mm) |
| $L = 5,9$ | długość sekcji CB linii kablowej (km) |
| $n_{CB} = 6$ | ilość odcinków w sekcji CB (-) |
| $\rho_E = 100$ | rezystywność ziemi (Ω/m) |
| $R_p = 0,188$ | rezystancja jednostkowa żył powrotnych (Ω/km) |
| $R_r = 5$ | rezystancja uziemienia słupa kablowego na prawym końcu linii kablowej (Ω) |
| $R_l = 5$ | rezystancja uziemienia słupa kablowego na lewym końcu linii kablowej (Ω) |
| $D_E = 93,1 \cdot \sqrt{\rho_E} = 931$ | odległość kabla od fikcyjnego przewodu powrotnego w ziemi (m) |

PARAMETRY LINII NAPOWIETRZNEJ DWUTOROWEJ

ASLH-D(S)bb 2 x 24 SMF (AL3 / A20SA 77/36 - 10,5)+ AFL-1,7 95
EWND Ps S3W3

| | |
|--------------------|--|
| $d_1 = 14,7$ | średnica zewnętrzna przewodu odgromowego 1 (mm) |
| $R_{GW1} = 0,364$ | rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego 1 w 20 degC (Ω/km) |
| $d_2 = 15$ | średnica zewnętrzna przewodu odgromowego 2 (mm) |
| $R_{GW2} = 0,3404$ | rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego 2 w 20 degC (Ω/km) |

$$d = \left(d_1 \cdot d_2 \right)^{\frac{1}{2}} = 14,85$$

średnica zewnętrzna przewodu odgromowego zastępczego (mm)

$$R_{GW} = \frac{(R_{GW1} \cdot R_{GW2})}{(R_{GW1} + R_{GW2})} = 0,18$$

rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego zastępczego (Ω/km)

$$D_{E1E2} = 2 \cdot 0,74 = 1,48$$

odległość pomiędzy przewodami odgromowymi (m)

$$D_{L1L2} = \sqrt{(3,67 - 2,52)^2 + (22,05 - 18,65)^2} = 3,59$$

$$D_{L2L3} = \sqrt{(3,67 - 2,62)^2 + (18,65 - 15,25)^2} = 3,56$$

$$D_{L1L3} = \sqrt{(2,52 - 2,62)^2 + (22,05 - 15,25)^2} = 6,8$$

$$D_L = \left(D_{L1L2} \cdot D_{L2L3} \cdot D_{L1L3} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,43$$

średnia odległość geometr. pomiędzy przewodami fazowymi danego toru (m)

$$D_{E1L1} = \sqrt{(2,52 - 0,74)^2 + (25,40 - 22,05)^2} = 3,79$$

$$D_{E1L2} = \sqrt{(3,67 - 0,74)^2 + (25,40 - 18,65)^2} = 7,36$$

$$D_{E1L3} = \sqrt{(2,62 - 0,74)^2 + (25,40 - 15,25)^2} = 10,32$$

$$D_{LE} = 1 \cdot \left(\left(D_{E1L1} \cdot D_{E1L2} \cdot D_{E1L3} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \right) = 6,61$$

śr. odległość geometr. pomiędzy przewodami fazowymi danego toru a przewodami odgromowymi (m)

$$GMR = 0,6 \cdot \frac{d}{2} = 4,45$$

geometryczny promień zastępczy przewodu odgromowego (mm)

$$GMR_w = \sqrt{2 \cdot GMR \cdot \frac{D_{E1E2}}{2} \cdot 1000} = 81,2$$

geometryczny promień zastępczy przewodów odgromowych, jako przewodu wiązkowego (mm)

$$a_{av} = 0,2361$$

średnia rozpiętość przęsła linii dwutorowej (km)

$$R_{ETL} = 10$$

rezystancja uziemienia słupów linii napowietrznej (Ω)

$$R_{ET1} = R_l$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego L (Ω)

$$R_{ET3} = 10$$

rezystancja uziemienia linii kablowej po środku (3) (Ω)

$$R_{ET2} = R_r$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego R (Ω)

$$R_{Es} = 0,4$$

rezystancja uziemienia stacji 1 (Ω)

PARAMETRY LINII NAPOWIETRZNEJ JEDNOTOROWEJ

KONSTRUKCJE TYPU B2

$$D_{LEb2} = 1 \cdot \left(\left(\sqrt{(5)^2 + (2,8)^2} \cdot \sqrt{(8,6)^2 + (2,8)^2} \cdot \sqrt{(8,6)^2 + (3,6)^2} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \right) = 7,85$$

$$Z_{EEb2} = R_{GW1} + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{GMR} \right) = 0,41 + 0,77 \cdot i$$

$$Z_{LEb2} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E}{D_{LEb2}} \right) = 0,05 + 0,3 \cdot i$$

$$\mu_{Lb2} = \frac{Z_{LEb2}}{Z_{EEb2}} = 0,33 + 0,11 \cdot i$$

KONSTRUKCJE TYPU S24

$$D_{LES24} = 1 \cdot \left(\sqrt{(5)^2 + (2,4)^2} \cdot \sqrt{(8,3)^2 + (2,8+0,5)^2} \cdot \sqrt{(8,3)^2 + (3,6-0,5)^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} = 7,6$$

$$Z_{EES24} = R_{GW2} + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{GMR} \right) = 0,39 + 0,77 \cdot i$$

$$Z_{LES24} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E}{D_{LES24}} \right) = 0,05 + 0,3 \cdot i$$

$$\mu_{LS24} = \frac{Z_{LES24}}{Z_{EES24}} = 0,34 + 0,11 \cdot i$$

PARAMETRY LINII NAPOWIETRZNEJ DWUTOROWEJ

jednostkowa impedancja własna przewodu odgromowego (Ω/km)

$$Z_{EE} = R_{GW} + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{GMR_w} \right) = 0,22 + 0,59 \cdot i$$

impedancja wzajemna przewód odgromowy - przewody robocze (Ω/km)

$$Z_{LE} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E}{D_{LE}} \right) = 0,05 + 0,31 \cdot i$$

$$\mu_L = \frac{Z_{LE}}{Z_{EE}} = 0,49 + 0,1 \cdot i$$

STOSUNEK IMPEDANCJI WZAJEMNEJ DO WŁASNEJ LINII KABLOWEJ

jednostkowa impedancja własna żyły powrotnej (Ω/km)

$$Z_{EEc} = R_p + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(2 \cdot \frac{D_E \cdot 10^3}{d_p} \right) = 0,24 + 0,64 \cdot i$$

impedancja wzajemna żyła powrotna - żyła robocza (Ω/km)

$$Z_{LEc} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(2 \cdot \frac{D_E \cdot 10^3}{d_p} \right) = 0,05 + 0,64 \cdot i$$

jednostkowa impedancja wzajemna obwodu ziemnopowrotnego w układzie trójkątnym - ułożenie w ziemi (Ω/km)

$$Z_{mc} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{D_1} \right) = 0,05 + 0,59 \cdot i$$

promień zastępczy trzech równoległe połączonych ekranów kabli

$$r_{zast} = \left(\frac{d_p}{2} \cdot D_1^2 \right)^{\frac{1}{3}} = 62,49$$

impedancja jednostkowa własna zastępczego przewodu, utworzonego przez 3 ekrany kabli w układzie CB - ułożenie w ziemi (Ω/km)

$$Z_{3Es} = \frac{1}{3} \cdot R_p + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{r_{zast}} \right) = 0,11 + 0,61 \cdot i$$

impedancja jednostkowa wzajemna żyły kabla ze zwarciami i zastępczego przewodu powrotnego

$$Z_{L3E} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{r_{zast}} \right) = 0,05 + 0,61 \cdot i$$

$$\mu_K = \frac{Z_{L3E}}{Z_{3Es}} = 0,98 + 0,1 \cdot i$$

DANE ZWARCIOWE I OBCIĄŻENIOWE

Zwarcie jednofazowe na słupie kablowym L

$$I L_{sc} = 3148 - 18940 \cdot i$$

$$I_{L30L} = 3 \cdot (-89 + 3855 \cdot i) \cdot (-1) = 270 - 12000 \cdot i$$

$$I_{L30R} = 3 \cdot (-959 + 2473 \cdot i) \cdot (-1) = 2877 - 7419 \cdot i$$

$$r_{LE_L} = 1 - \mu_L = 0,51 - 0,1 \cdot i$$

$$r_{LE_R} = \left(1 - (\mu_K - \mu_{Lb2}) \right) = 0,35 + 0,01 \cdot i$$

$$I L_{3F} = 19200 \cdot e^{1 \cdot i \cdot \left((-81) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{360} \right)} \quad \text{prąd zwarcia trójfazowego (A)}$$

Zwarcie jednofazowe na słupie kablowym R

$$I R_{sc} = 3100 - 18820 \cdot i$$

$$I_{R30L} = (608 - 2467 \cdot i) \cdot 3 \cdot (1) = 1824 - 7401 \cdot i$$

$$I_{R30R} = (-424 + 3818 \cdot i) \cdot (-3) = 1272 - 11454 \cdot i$$

$$r_{RE_L} = 1 - (\mu_K - \mu_L) = 0,51$$

$$r_{RE_R} = 1 - \mu_{Lb2} = 0,67 - 0,11 \cdot i$$

$$IR_{3F} = 18500 \cdot e \quad 1 \cdot i \cdot \left((-86) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \quad \text{prąd zwarcia trójfazowego (A)}$$

impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej jednotorowej (Ω)

$$Z_{infs24} = \frac{1}{2} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EES24} + \sqrt{a_{av} \cdot Z_{EES24} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EES24} + 4 \cdot R_{ETL} \right)} \right) = 1,26 + 0,84 \cdot i$$

$$Z_{infs24} = a_{av} \cdot Z_{EES24} \cdot 0,5 + \sqrt{\left(a_{av} \cdot Z_{EES24} \cdot 0,5 \right)^2 + a_{av} \cdot Z_{EES24} \cdot R_{ETL}} = 1,26 + 0,84 \cdot i$$

$$|Z_{infs24}| = 1,52$$

$$Z_{infb2} = \frac{1}{2} \cdot \left(0,2 \cdot Z_{EEb2} + \sqrt{0,2 \cdot Z_{EEb2} \cdot \left(0,2 \cdot Z_{EEb2} + 4 \cdot R_{ETL} \right)} \right) = 1,18 + 0,76 \cdot i$$

$$|Z_{infb2}| = 1,4$$

$$Z_{inf} = \frac{1}{2} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EE} + \sqrt{a_{av} \cdot Z_{EE} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EE} + 4 \cdot R_{ETL} \right)} \right) = 1,03 + 0,76 \cdot i$$

$$|Z_{inf}| = 1,28$$

impedancja schematu drabinkowego linii kablowej w układzie CB (Ω) wg IEC 60909-3

$$Z_R = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{Z_{infs24}} + \frac{1}{Z_{infb2}}} = 0,57 + 0,32 \cdot i$$

$$Z_L = \frac{1}{\frac{1}{R_l} + \frac{1}{Z_{inf}}} = 0,92 + 0,52 \cdot i$$

$$Z_P = \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot 0,5 + \sqrt{\left(\frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot 0,5 \right)^2 + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot R_{ET3}} = 3,39 + 3,7 \cdot i$$

$$k = 1 + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot \left(\frac{1}{R_{ET3}} + \frac{1}{Z_P} \right) = 1,34 + 0,37 \cdot i$$

impedancja widziana od strony słupa kablowego L dla dwóch dużych sekcji CB

$$Z_{PL} = \frac{\left(Z_P \cdot \left(Z_R + Z_P \right) \cdot \left(k^2 \right) + \left(\left(Z_P \cdot \left(Z_R - Z_P + 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) - \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot \left(Z_R + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) \right) \cdot k^{-2} \right)}{\left(Z_R + Z_P \right) \cdot k^2 - \left(Z_R - Z_P + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) \cdot k^{-2}} =$$

$$= 2,36 + 4,21 \cdot i$$

impedancja widziana od strony słupa kablowego R dla dwóch dużych sekcji CB

$$Z_{PR} = \frac{\left(Z_P \cdot (Z_L + Z_P) \cdot (k^2) + \left(\left(Z_P \cdot \left(Z_L - Z_P + 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) - \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \cdot \left(Z_L + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) \right) \cdot k^{-2} \right) \right)}{\left(Z_L + Z_P \right) \cdot k^2 - \left(Z_L - Z_P + \frac{L}{2} \cdot Z_{3ES} \right) \cdot k^{-2}} =$$

$$= 2,55 + 4,11 \cdot i$$

wypadkowa impedancja układu uziemiającego przy zwarcu na słupie L (Ω)

$$Z_{EL} = \frac{1}{\frac{1}{R_l} + \frac{1}{Z_{inf}} + \frac{1}{Z_{PL}}} = 0,73 + 0,51 \cdot i$$

$$|Z_{EL}| = 0,89$$

$$I_{EL} = r_{LE_L} \cdot I_{L30L} + r_{LE_R} \cdot I_{L30R} = 30,34 - 8473,94 \cdot i$$

$$|I_{EL}| = 8473,99 \quad \text{prąd uziomowy (sumaryczny) przy zwarcu na słupie kablowym L}$$

napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup L (Ω)

$$U_{EL} = I_{EL} \cdot Z_{EL} = 4302,57 - 6142,77 \cdot i$$

$$|U_{EL}| = 7499,72$$

prąd uziomowy słupa kablowego L

$$I_{ETL} = \frac{U_{EL}}{R_l} = 860,51 - 1228,55 \cdot i \quad |I_{ETL}| = 1499,94 \quad \arg(I_{ETL}) = -54,99^\circ$$

wypadkowa impedancja układu uziemiającego dla słupa R (Ω)

$$Z_{ER} = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{Z_{infs24}} + \frac{1}{Z_{PR}} + \frac{1}{Z_{infb2}}} = 0,49 + 0,31 \cdot i$$

$$I_{ER} = r_{RE_L} \cdot I_{R30L} + r_{RE_R} \cdot I_{R30R} = 514,63 - 11578,36 \cdot i$$

$$|I_{ER}| = 11589,79 \quad \text{prąd uziomowy (sumaryczny) przy zwarcu na słupie kablowym R}$$

napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R (Ω)

$$U_{ER} = I_{ER} \cdot Z_{ER} = 3855,36 - 5489,69 \cdot i$$

$$|U_{ER}| = 6708,24$$

prąd uziomowy słupa kablowego R

$$I_{ETR} = \frac{U_{ER}}{R_r} = 771,07 - 1097,94 \cdot i \quad |I_{ETR}| = 1341,65 \quad \arg(I_{ETR}) = -54,92^\circ$$

Wyznaczenie prądów doziemnych oraz wartości prądów w żyłach powrotnych kabli wg wytycznych PSE

$$I_{gR} = \frac{IR_{sc} \cdot (Z_{3ES} - Z_{L3E}) \cdot L}{Z_{3ES} \cdot L + Z_R + Z_L} \quad |I_{gR}| = 1440,13$$

$$I_{gL} = \frac{IL_{sc} \cdot (Z_{3ES} - Z_{L3E}) \cdot L}{Z_{3ES} \cdot L + Z_R + Z_L} = -1181,62 - 839,81 \cdot i \quad |I_{gL}| = 1449,66$$

NAPIĘCIE NA ŻYŁACH POWROTNYCH PRZY ZWARCIU JEDNOFAZOWYM POZA LINIĄ KABLOWĄ**Całkowity prąd w żyłach powrotnych kabli (A)**

$$I_{pR} = IR_{sc} - I_{gR} = 4275,06 - 17987,42 \cdot i$$

$$I_{pL} = IL_{sc} - I_{gL} = 4329,62 - 18100,19 \cdot i$$

zakłada się przepływ całości prądu zwarciovego przez zastępczy przewód powrotny, tj. nie uwzględnia się rozptywu prądu

strata napięcia na żyłach powrotnej kabla (V)

$$\Delta U_{Lp} = \left(\frac{I_{pL}}{3} \cdot (Z_{EEc} + 2 \cdot Z_{mc}) \cdot \frac{L}{n_{CB}} - IL_{sc} \cdot Z_{LEc} \cdot \frac{L}{n_{CB}} \right) = -813,12 - 477,73 \cdot i$$

$$|\Delta U_{Lp}| = 943,07$$

$$\Delta U_{Rp} = \left(\frac{I_{pR}}{3} \cdot (Z_{EEc} + 2 \cdot Z_{mc}) \cdot \frac{L}{n_{CB}} - IR_{sc} \cdot Z_{LEc} \cdot \frac{L}{n_{CB}} \right) = -808,46 - 473,42 \cdot i$$

$$|\Delta U_{Rp}| = 936,87$$

**Napięcie na ogranicznikach przepięć SVL przy zwarciu jednofazowym zewnętrznym (V)
- słup L**

$$U_{i11} = (U_{EL} + \Delta U_{Lp}) = 3489,45 - 6620,5 \cdot i$$

$$\boxed{|U_{i11}| = 7483,8}$$

$$\arg(U_{i11}) = -62,21^\circ$$

**Napięcie na ogranicznikach przepięć SVL przy zwarciu jednofazowym zewnętrznym (V)
- słup L**

$$ZU_{i22} = (U_{ER} - \Delta U_{Rp}) = 4663,82 - 5016,27 \cdot i$$

$$\boxed{|ZU_{i22}| = 6849,4}$$

$$\arg(ZU_{i22}) = -47,09^\circ$$

**NAPIĘCIE NA ŻYŁACH POWROTNYCH PRZY OBCIĄŻENIU ROBOCZYM LUB
PRZY ZWARCIU TRÓJFAZOWYM POZA LINIĄ KABLOWĄ**

Napięcie jednostkowe w miejscu krzyżowania żył powrotnych (V/km)

$$E'_p = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{D_1}{d_p} \right) \right) \cdot 10^{-4} = 0,05$$

$$E'_p = 0,145 \cdot \left(\lg \left(2 \cdot \frac{D_1}{d_p} \right) \right) = 0,05$$

Napięcie w miejscu krzyżowania żył powrotnych - obciążenie robocze 830 A w (V)

$$U_{LE} = 830 \cdot E'_p \cdot \frac{L}{n_{CB}} = 41,88$$

Napięcie w miejscu krzyżowania żył powrotnych - zwarcie trójfazowe (V)

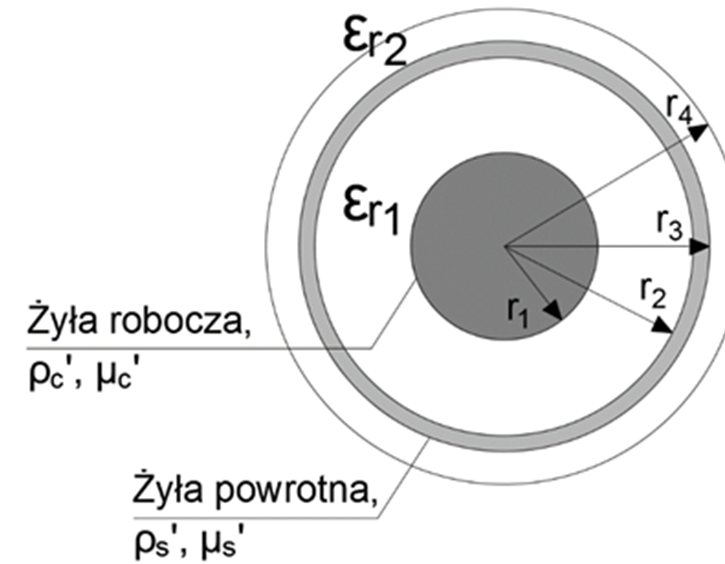
$$U_{3LE} = I L_{3F} \cdot E'_p \cdot \frac{L}{n_{CB}} = 151,56 - 956,93 \cdot i$$

$$\boxed{|U_{3LE}| = 968,86}$$

$$\arg(U_{3LE}) = -81^\circ$$

Specyfikacja parametrów kabla 110 kV oraz dane podstawowe linii kablowej

| | | |
|--|--|--|
| $d_{\dot{z}r} = 35 \text{ mm}$ | średnica żyły roboczej | |
| $g_{er} = 1,15 \text{ mm}$ | grubość ekranu półprzewodzącego na żyły roboczej | |
| $g_{izol} = 15 \text{ mm}$ | grubość izolacji | |
| $d_{izol} = 67,3 \text{ mm}$ | średnica na izolacji | |
| $g_{eizol} = 1 \text{ mm}$ | grubość ekranu na izolacji | |
| $g_{tp} = 2 \cdot 0,35 \text{ mm} = 0,0007 \text{ m}$ | grubość taśmy półprzewodzącej blokującej wodę | |
| $rd = \frac{1,44}{2} \text{ mm} = 0,00072 \text{ m}$ | promień drutu miedzianego wchodzącego w skład żyły powrotnej | |
| $d_{\dot{z}p} = 72,8 \text{ mm}$ | średnica na żyły powrotnej | |
| $g_{tpw} = 2 \cdot 0,35 \text{ mm} = 0,0007 \text{ m}$ | grubość taśmy półprzewodzącej blokującej wodę | |
| $g_{AL} = 0,2 \text{ mm}$ | grubość taśmy AL | |
| $d_{AL} = 74,5 \text{ mm}$ | średnica na taśmie aluminiowej | |
| $g_{pzew} = 3,6 \text{ mm}$ | grubość powłoki zewnętrznej | |
| $d_k = 82 \text{ mm}$ | średnica kabla | |
| $Rdc_c = 0,0221 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc źr | |
| $Rdc_s_{CU} = 0,188 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc źp | |
| $Rdc_s_{AL} = 0,560 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc taśmy AL | |
| $As = 95 \text{ mm}^2$ | nominalny przekrój źp | |
| $Ac = 800 \text{ mm}^2$ | nominalny przekrój źr | |
| $l = 1000 \text{ m}$ | długość referencyjna linii kablowej | |
| $Lsek = 950 \text{ m}$ | długość sekcji CB w [m] | |
| $Ck = 0,225 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$ | pojemność kabla | |
| $L = 2 \cdot 3 \cdot Lsek = 5700,00 \text{ m}$ | całkowita długość linii kablowej | |
| $f = 50 \text{ Hz}$ | $n_c = 6$ | liczba przewodów fazowych |
| $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314,2 \text{ Hz}$ | $n = n_c \cdot 2 + 1 = 13$ | liczba przewodników, 6 fazowych, 6 ekranów, 1 ziemia |
| $\rho_e = 100 \frac{\Omega \cdot \text{m}}$ | $l_{sek} = 6$ | liczba sekcji CB |
| $R'e = \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} = 4,935 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{m}}$ | | |



$$r1 = \frac{d_{\dot{z}r}}{2} = 0,0175 \text{ m}$$

$$r2 = \left(\frac{d_{izol}}{2} + g_{eizol} + g_{tp} \right) = 0,03535 \text{ m}$$

$$rw = r2 + 2 \cdot rd = 0,03679 \text{ m}$$

$$r3 = \frac{d_{AL}}{2} = 0,0372 \text{ m}$$

$$r = \frac{r2}{r3} = 0,949$$

współczynnik wypełnienia dla źp

$$r4 = \frac{d_k}{2} = 0,04100 \text{ m}$$

$$rs = \frac{(r3 - r2)}{2} + r2 = 0,03630 \text{ m}$$

$$\alpha_p = e^{-\frac{\left(0,25 - r^2 + r^4 \cdot \left(0,75 - \log_e(r)\right)\right)}{\left(1 - r^2\right)^2}} = 0,98315$$

$$Z_{inf} = 1,0307 + 0,7633 \cdot i$$

impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej dwutorowej (Ω)

$$Z_{infb2} = 1,1761 + 0,7597 \cdot i$$

impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej jednotorowej B2 (Ω)

$$Z_{infs24} = 1,2621 + 0,8433 \cdot i$$

impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej jednotorowej S24 (Ω)

$$R_r = 5$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego na prawym końcu linii kablowej (Ω)

$$R_l = 5$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego na lewym końcu linii kablowej (Ω)

$$Z_R = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{Z_{infs24}} + \frac{1}{Z_{infb2}}} = 0,565279 + 0,316061 \cdot i$$

wypadkowa impedancja systemu uziemień po prawej stronie linii kablowej (Ω)

$$Z_L = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{Z_{inf}}} = 0,919906 + 0,516414 \cdot i$$

wypadkowa impedancja systemu uziemień po lewej stronie linii kablowej (Ω)

$$Zr = \left(Z_R \right) \Omega \quad Zl = \left(Z_L \right) \Omega$$

$$a = \exp\left(i \cdot \frac{120}{180} \cdot \pi\right) = -0,5 + 0,866 \cdot i \quad \text{operator obrotu } a$$

$$\alpha = 0,779$$

$$rcov = 1000 \text{ m}$$

$$De = \frac{1,85}{\sqrt{\omega \cdot \frac{\mu_0}{\rho e}}} = 931,1 \text{ m}$$

współczynnik wypełnienia dla żr

promień fikcyjnego cylindra

$$Ze1 = \frac{Zl}{L} = \left(1,614 \cdot 10^{-4} + 9,06 \cdot 10^{-5} \cdot i\right) \frac{\Omega}{\text{m}}$$

Impedancje lewa i prawa przeskalowane względem długości linii kablowej na (Ω/m)

$$Ze2 = \frac{Zr}{L} = \left(9,9172 \cdot 10^{-5} + 5,5449 \cdot 10^{-5} \cdot i\right) \frac{\Omega}{\text{m}}$$

Wyznaczenie macierzy modelu wielofazowego linii kablowej

$$Ze = (R'e + Ze1 + Ze2) = (0,0003 + 0,0001 \cdot i) \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$poz = 0,435 \text{ m} \quad gle1 = 1,2 \text{ m} + r4 = 1,241 \text{ m}$$

$$odl = 2 \text{ m} \quad gle2 = gle1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r4 \cdot 2 = 1,312 \text{ m}$$

$$x1 = \begin{bmatrix} poz - r4 \\ poz \\ poz + r4 \\ poz - r4 + odl \\ poz + odl \\ poz + r4 + odl \\ poz - r4 \\ poz \\ poz + r4 \\ poz - r4 + odl \\ poz + odl \\ poz + r4 + odl \\ 1 \text{ m} + poz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,394 \text{ m} \\ 0,435 \text{ m} \\ 0,476 \text{ m} \\ 2,394 \text{ m} \\ 2,435 \text{ m} \\ 2,476 \text{ m} \\ 0,394 \text{ m} \\ 0,435 \text{ m} \\ 0,476 \text{ m} \\ 2,394 \text{ m} \\ 2,435 \text{ m} \\ 2,476 \text{ m} \\ 1,435 \text{ m} \end{bmatrix} \quad y1 = \begin{bmatrix} gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ De \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 931,0904 \text{ m} \end{bmatrix}$$

Macierze współrzędnych pozycji poszczególnych przewodników - C1-C3, C4-C6, S1-S3, S4-S6, ziemia

$$gm = \begin{bmatrix} r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ De \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 931,09 \text{ m} \end{bmatrix}$$

```

for k1 ∈ [1..n]
  for k2 ∈ [1..n]
    if ((k1 = k2))
      gk1 k2 = gmk1
    else
      gk1 k2 = √((x1k1 - x1k2)2 + (y1k1 - y1k2)2)

for k1 ∈ [1..n]
  for k2 ∈ [1..n]
    if (((|k1 - k2| = n_c) ∧ (k1 < n)) ∧ (k2 < n))
      gk1 k2 = rs
    else
      gk1 k2 = gk1 k2

```


Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu jednofazowym na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 3100 - 18820 \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ -2 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-14} + 2 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 641 + 517 \cdot i \\ 13475 - 5477 \cdot i \\ 985 - 5083 \cdot i \\ 978 - 5068 \cdot i \\ -29 + 1123 \cdot i \\ -39 + 1144 \cdot i \\ -44 + 1164 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 3100 - 18820 \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ -2 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-14} + 2 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ -1939 + 5823 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 692 + 278 \cdot i \\ 641 + 517 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 13475 - 5477 \cdot i \\ 985 - 5083 \cdot i \\ 978 - 5068 \cdot i \\ -29 + 1123 \cdot i \\ -39 + 1144 \cdot i \\ -44 + 1164 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \\ 702 + 1446 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$\begin{aligned} |VAR_{13} A| &= 823 A \quad \arg(VAR_{13}) = 39^\circ \\ |VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm}| &= 4117 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R} \end{aligned}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm} + \Delta Up71) \right) = (3933 + 2923 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 4900 V \quad \arg(U_{i22}) = 37^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92) \right) = (4446 + 4563 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 6371 V \quad \arg(U_{i11}) = 46^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu dwufazowym z ziemią na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 2380 - 20132 \cdot i \\ -18625 + 8005 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 783 - 354 \cdot i \\ 8897 - 4454 \cdot i \\ -11819 - 14394 \cdot i \\ -4317 - 3420 \cdot i \\ 993 + 562 \cdot i \\ 1005 + 576 \cdot i \\ 1027 + 601 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 2380 - 20132 \cdot i \\ -18625 + 8005 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 4531 + 4679 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 623 - 519 \cdot i \\ 783 - 354 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 8897 - 4454 \cdot i \\ -11819 - 14394 \cdot i \\ -4317 - 3420 \cdot i \\ 993 + 562 \cdot i \\ 1005 + 576 \cdot i \\ 1027 + 601 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \\ 1678 + 28 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$\begin{aligned} |VAR_{13} A| &= 860 A \quad \arg(VAR_{13}) = -24^\circ \\ |VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm}| &= 4298 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R} \end{aligned}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm} + \Delta Up71) \right) = (4978 - 1387 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 5167 V \quad \arg(U_{i22}) = -16^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92) \right) = (6741 - 1089 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 6829 V \quad \arg(U_{i11}) = -9^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu dwufazowym na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 9102 - 13317 \cdot i \\ -9102 + 13317 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-14} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-13} + 8 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -9 + 8 \cdot i \\ -9 + 8 \cdot i \\ -9 + 8 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ -13 + 7 \cdot i \\ 9687 + 4164 \cdot i \\ -9721 - 4179 \cdot i \\ -17 - 7 \cdot i \\ -42 + 13 \cdot i \\ -46 + 10 \cdot i \\ -38 + 15 \cdot i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 9102 - 13317 \cdot i \\ -9102 + 13317 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-14} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-13} + 8 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -9 + 8 \cdot i \\ -9 + 8 \cdot i \\ -9 + 8 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ -13 + 7 \cdot i \\ 9687 + 4164 \cdot i \\ -9721 - 4179 \cdot i \\ -17 - 7 \cdot i \\ -42 + 13 \cdot i \\ -46 + 10 \cdot i \\ -38 + 15 \cdot i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 9687 + 4164 \cdot i \\ -9721 - 4179 \cdot i \\ -17 - 7 \cdot i \\ -42 + 13 \cdot i \\ -46 + 10 \cdot i \\ -38 + 15 \cdot i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \\ -27 + i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 14 \text{ A} \quad \arg(VAR_{13}) = 152^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_x \text{ ohm}| = 71 \text{ V} \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = ((VAR_{13}) A \cdot R_x \text{ ohm} + \Delta Up71) = (581 + 476 \cdot i) \text{ V} \quad |U_{i22}| = 751 \text{ V} \quad \arg(U_{i22}) = 39^\circ$$

$$U_{i11} = ((VAR_{13}) A \cdot R_x \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92) = (549 + 477 \cdot i) \text{ V}$$

$$|U_{i11}| = 727 \text{ V} \quad \arg(U_{i11}) = 41^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu trójfazowym z ziemią na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 1519 - 18683 \cdot i \\ -16939 + 8026 \cdot i \\ 15420 + 10657 \cdot i \\ 3 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-15} \cdot i \\ 0 \\ 6 + 25 \cdot i \\ 6 + 25 \cdot i \\ 6 + 25 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -1 + 29 \cdot i \\ 12165 - 1354 \cdot i \\ -7323 - 9851 \cdot i \\ -4936 + 11275 \cdot i \\ -24 + 93 \cdot i \\ -23 + 83 \cdot i \\ -14 + 88 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 1519 - 18683 \cdot i \\ -16939 + 8026 \cdot i \\ 15420 + 10657 \cdot i \\ 3 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-15} \cdot i \\ 0 \\ 6 + 25 \cdot i \\ 6 + 25 \cdot i \\ 6 + 25 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -5 - 35 \cdot i \\ -1 + 29 \cdot i \\ 12165 - 1354 \cdot i \\ -7323 - 9851 \cdot i \\ -4936 + 11275 \cdot i \\ -24 + 93 \cdot i \\ -23 + 83 \cdot i \\ -14 + 88 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 12165 - 1354 \cdot i \\ -7323 - 9851 \cdot i \\ -4936 + 11275 \cdot i \\ -24 + 93 \cdot i \\ -23 + 83 \cdot i \\ -14 + 88 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \\ -26 + 50 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 29 \text{ A} \quad \arg(VAR_{13}) = 92^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_x \text{ ohm}| = 144 \text{ V} \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = ((VAR_{13}) A \cdot R_x \text{ ohm} + \Delta Up71) = (899 + 226 \cdot i) \text{ V} \quad |U_{i22}| = 927 \text{ V} \quad \arg(U_{i22}) = 14^\circ$$

$$U_{i11} = ((VAR_{13}) A \cdot R_x \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92) = (350 + 1035 \cdot i) \text{ V}$$

$$|U_{i11}| = 1093 \text{ V} \quad \arg(U_{i11}) = 71^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi - Słup R, przy zwarciu jednofazowym na słupie kablowym L

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 3148 - 18949 \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ -2 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-14} + 2 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 645 + 521 \cdot i \\ 13578 - 5497 \cdot i \\ 999 - 5118 \cdot i \\ 992 - 5102 \cdot i \\ -31 + 1131 \cdot i \\ -41 + 1152 \cdot i \\ -45 + 1172 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 3148 - 18949 \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ -2 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-14} + 2 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ -1961 + 5861 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 696 + 281 \cdot i \\ 645 + 521 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
prąd fazy b - tor 1
prąd fazy c - tor 1
prąd fazy a - tor 2
prąd fazy b - tor 2
prąd fazy c - tor 2
prąd żp fazy a - tor 1
prąd żp fazy b - tor 1
prąd żp fazy c - tor 1
prąd żp fazy a - tor 2
prąd żp fazy b - tor 2
prąd żp fazy c - tor 2
prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 13578 - 5497 \cdot i \\ 999 - 5118 \cdot i \\ 992 - 5102 \cdot i \\ -31 + 1131 \cdot i \\ -41 + 1152 \cdot i \\ -45 + 1172 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \\ 705 + 1457 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 829 A \quad \arg(VAR_{13}) = 39^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \cdot ohm| = 4146 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \cdot ohm + \Delta Up71 \right) = (3957 + 2949 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 4935 V \quad \arg(U_{i22}) = 37^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \cdot ohm + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92 \right) = (4471 + 4601 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 6416 V \quad \arg(U_{i11}) = 46^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi - Słup R, przy zwarciu dwufazowym z ziemią na słupie kablowym L

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 2596 - 20374 \cdot i \\ -18942 + 7939 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 797 - 351 \cdot i \\ 9054 - 4431 \cdot i \\ -11841 - 14691 \cdot i \\ -4342 - 3504 \cdot i \\ 1001 + 578 \cdot i \\ 1013 + 593 \cdot i \\ 1035 + 618 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 2596 - 20374 \cdot i \\ -18942 + 7939 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 4548 + 4782 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 636 - 520 \cdot i \\ 797 - 351 \cdot i \\ 9054 - 4431 \cdot i \\ -11841 - 14691 \cdot i \\ -4342 - 3504 \cdot i \\ 1001 + 578 \cdot i \\ 1013 + 593 \cdot i \\ 1035 + 618 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
prąd fazy b - tor 1
prąd fazy c - tor 1
prąd fazy a - tor 2
prąd fazy b - tor 2
prąd fazy c - tor 2
prąd żp fazy a - tor 1
prąd żp fazy b - tor 1
prąd żp fazy c - tor 1
prąd żp fazy a - tor 2
prąd żp fazy b - tor 2
prąd żp fazy c - tor 2
prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 9054 - 4431 \cdot i \\ -11841 - 14691 \cdot i \\ -4342 - 3504 \cdot i \\ 1001 + 578 \cdot i \\ 1013 + 593 \cdot i \\ 1035 + 618 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \\ 1700 + 43 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 871 A \quad \arg(VAR_{13}) = -24^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \cdot ohm| = 4354 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \cdot ohm + \Delta Up71 \right) = (5056 - 1359 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 5235 V \quad \arg(U_{i22}) = -15^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \cdot ohm + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92 \right) = (6839 - 1041 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 6918 V \quad \arg(U_{i11}) = -9^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi - Słup R, przy zwarciu dwufazowym na słupie kablowym L

Wzrost lokalnego potencjału ziemi - Słup R, przy zwarciu trójfazowym z ziemią na słupie kablowym L

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 9286 - 13571 \cdot i \\ -9286 + 13571 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-14} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-13} + 8 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -10 + 9 \cdot i \\ -10 + 9 \cdot i \\ -10 + 9 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ -13 + 7 \cdot i \\ 9873 + 4250 \cdot i \\ -9908 - 4265 \cdot i \\ -17 - 7 \cdot i \\ -43 + 13 \cdot i \\ -47 + 10 \cdot i \\ -39 + 16 \cdot i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 9286 - 13571 \cdot i \\ -9286 + 13571 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-14} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -3 \cdot 10^{-13} + 8 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -10 + 9 \cdot i \\ -10 + 9 \cdot i \\ -10 + 9 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ 14 - 11 \cdot i \\ -13 + 7 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 9873 + 4250 \cdot i \\ -9908 - 4265 \cdot i \\ -17 - 7 \cdot i \\ -43 + 13 \cdot i \\ -47 + 10 \cdot i \\ -39 + 16 \cdot i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \\ -28 + i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 14 A \quad \arg(VAR_{13}) = 152^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \text{ ohm}| = 72 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} + \Delta Up71 \right) = (592 + 485 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 765 V \quad \arg(U_{i22}) = 39^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92 \right) = (559 + 487 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 742 V \quad \arg(U_{i11}) = 41^\circ$$

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 1642 - 18993 \cdot i \\ -17269 + 8074 \cdot i \\ 15627 + 10919 \cdot i \\ 3 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} + 4 \cdot 10^{-15} \cdot i \\ 0 \\ 5 + 26 \cdot i \\ 5 + 26 \cdot i \\ 5 + 26 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -1 + 29 \cdot i \\ 12379 - 1314 \cdot i \\ -7396 - 10057 \cdot i \\ -5079 + 11441 \cdot i \\ -25 + 94 \cdot i \\ -23 + 84 \cdot i \\ -15 + 90 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 1642 - 18993 \cdot i \\ -17269 + 8074 \cdot i \\ 15627 + 10919 \cdot i \\ 3 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} + 4 \cdot 10^{-15} \cdot i \\ 0 \\ 5 + 26 \cdot i \\ 5 + 26 \cdot i \\ 5 + 26 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -1 + 29 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 12379 - 1314 \cdot i \\ -7396 - 10057 \cdot i \\ -5079 + 11441 \cdot i \\ -25 + 94 \cdot i \\ -23 + 84 \cdot i \\ -15 + 90 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \\ -26 + 51 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 29 A \quad \arg(VAR_{13}) = 93^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \text{ ohm}| = 146 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} + \Delta Up71 \right) = (913 + 235 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 943 V \quad \arg(U_{i22}) = 14^\circ$$

$$U_{i11} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} + \Delta Up71 + \Delta Up72 + \Delta Up73 + \Delta Up81 + \Delta Up82 + \Delta Up83 + \Delta Up91 + \Delta Up92 \right) = (351 + 1054 \cdot i) V$$

$$|U_{i11}| = 1111 V \quad \arg(U_{i11}) = 72^\circ$$

Załącznik zawiera obliczenia napięć indukowanych układu 2 zaprezentowanego na rysunku 7.3 wykonane w programie SMath Studio Desktop z założeniem sprowadzenia analizowanego systemu do układu jednofazowego, w tym również przy wykorzystaniu wzorów uproszczonych zaczerpniętych z [35, 47].

DANE PODSTAWOWE LINII KABLOWEJ

| | |
|--|--|
| $D_1 = 82$ | odległość między osiami kabli - ułożenie w ziemi (mm) |
| $d_p = 72,6$ | średnia średnica żyły powrotnej kabla [mm] |
| $L = 5,9$ | długość sekcji CB linii kablowej (km) |
| $n_{CB} = 6$ | ilość odcinków w sekcji CB (-) |
| $\rho_E = 100$ | rezystywność ziemi (Ω/m) |
| $R_p = 0,188$ | rezystancja jednostkowa żył powrotnych (Ω/km) |
| $R_r = 5$ | rezystancja uziemienia słupa kablowego na prawym końcu linii kablowej (Ω) |
| $R_l = 0,4$ | rezystancja uziemienia na lewym końcu linii kablowej (Ω) |
| $D_E = 93,1 \cdot \sqrt{\rho_E} = 931$ | odległość kabla od fikcyjnego przewodu powrotnego w ziemi (m) |

PARAMETRY LINII NAPOWIETRZNEJ DWUTOROWEJ

ASLH-D(S)bb 2 x 24 SMF (AL3 / A20SA 77/36 - 10,5)+ AFL-1,7 95
EWND Ps S3W3

| | |
|---|--|
| $d_1 = 14,7$ | średnica zewnętrzna przewodu odgromowego 1 (mm) |
| $R_{GW1} = 0,364$ | rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego 1 w 20 degC (Ω/km) |
| $d_2 = 15$ | średnica zewnętrzna przewodu odgromowego 2 (mm) |
| $R_{GW2} = 0,3404$ | rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego 2 w 20 degC (Ω/km) |
| $d = \left(d_1 \cdot d_2 \right)^{\frac{1}{2}} = 14,85$ | średnica zewnętrzna przewodu odgromowego zastępczego (mm) |
| $R_{GW} = \frac{\left(R_{GW1} \cdot R_{GW2} \right)}{\left(R_{GW1} + R_{GW2} \right)} = 0,18$ | rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego zastępczego (Ω/km) |
| $D_{E1E2} = 2 \cdot 0,74 = 1,48$ | odległość pomiędzy przewodami odgromowymi (m) |
| $D_{L1L2} = \sqrt{\left(3,67 - 2,52 \right)^2 + \left(22,05 - 18,65 \right)^2} = 3,59$ | |
| $D_{L2L3} = \sqrt{\left(3,67 - 2,62 \right)^2 + \left(18,65 - 15,25 \right)^2} = 3,56$ | |
| $D_{L1L3} = \sqrt{\left(2,52 - 2,62 \right)^2 + \left(22,05 - 15,25 \right)^2} = 6,8$ | |
| $D_L = \left(D_{L1L2} \cdot D_{L2L3} \cdot D_{L1L3} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,43$ | średnia odległość geometr. pomiędzy przewodami fazowymi danego toru (m) |

$$D_{E1L1} = \sqrt{(2,52 - 0,74)^2 + (25,40 - 22,05)^2} = 3,79$$

$$D_{E1L2} = \sqrt{(3,67 - 0,74)^2 + (25,40 - 18,65)^2} = 7,36$$

$$D_{E1L3} = \sqrt{(2,62 - 0,74)^2 + (25,40 - 15,25)^2} = 10,32$$

$$D_{LE} = 1 \cdot \left(D_{E1L1} \cdot D_{E1L2} \cdot D_{E1L3} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} = 6,61$$

śr. odległość geometr. pomiędzy przewodami fazowymi danego toru a przewodami odgromowymi (m)

$$GMR = 0,6 \cdot \frac{d}{2} = 4,45$$

geometryczny promień zastępczy przewodu odgromowego (mm)

$$GMR_w = \sqrt{2 \cdot GMR \cdot \frac{D_{E1E2}}{2} \cdot 1000} = 81,2$$

geometryczny promień zastępczy przewodów odgromowych (jako przewodu wiązkowego) (mm)

$$a_{av} = 0,2361$$

średnia rozpiętość przęsła linii dwutorowej (km)

$$R_{ETL} = 10$$

rezystancja uziemienia słupów linii napowietrznej (Ω)

$$R_{ET1} = R_l$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego L (Ω)

$$R_{ET3} = 10$$

rezystancja uziemienia linii kablowej po środku (3) (Ω)

$$R_{ET2} = R_r$$

rezystancja uziemienia słupa kablowego R (Ω)

$$R_{Es} = 0,4$$

rezystancja uziemienia stacji 1 (Ω)

jednostkowa impedancja własna przewodu odgromowego (Ω/km)

$$Z_{EE} = R_{GW} + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{GMR_w} \right) = 0,22 + 0,59 \cdot i$$

impedancja wzajemna przewodów odgromowy - przewody robocze (Ω/km)

$$Z_{LE} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E}{D_{LE}} \right) = 0,05 + 0,31 \cdot i$$

$$\mu_L = \frac{Z_{LE}}{Z_{EE}} = 0,49 + 0,1 \cdot i$$

STOSUNEK IMPEDANCJI WZAJEMNEJ DO WŁASNEJ LINII KABLOWEJ

jednostkowa impedancja własna żyły powrotnej (Ω/km)

$$Z_{EEC} = R_p + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(2 \cdot \frac{D_E \cdot 10^3}{d_p} \right) = 0,24 + 0,64 \cdot i$$

impedancja wzajemna żyła powrotna - żyła robocza (Ω/km)

$$Z_{LEc} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(2 \cdot \frac{D_E \cdot 10^3}{d_p} \right) = 0,05 + 0,64 \cdot i$$

jednostkowa impedancja wzajemna obwodu ziemnopowrotnego w układzie trójkątnym - ułożenie w ziemi (Ω/km)

$$Z_{mc} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{D_1} \right) = 0,05 + 0,59 \cdot i$$

promień zastępczy trzech równolegle połączonych ekranów kabli

$$r_{zast} = \left(\frac{d_p}{2} \cdot D_1^2 \right)^{\frac{1}{3}} = 62,49$$

impedancja jednostkowa własna zastępczego przewodu, utworzonego przez 3 ekrany kabli w układzie CB - ułożenie w ziemi (Ω/km)

$$Z_{3Es} = \frac{1}{3} \cdot R_p + 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{r_{zast}} \right) = 0,11 + 0,61 \cdot i$$

impedancja jednostkowa wzajemna żyły kabla ze zwarcie i zastępczego przewodu powrotnego

$$Z_{L3E} = 0,049 + i \cdot 0,145 \cdot \lg \left(\frac{D_E \cdot 10^3}{r_{zast}} \right) = 0,05 + 0,61 \cdot i$$

$$\mu_K = \frac{Z_{L3E}}{Z_{3Es}} = 0,98 + 0,1 \cdot i$$

DANE ZWARCIOWE I OBCIĄŻENIOWE

Zwarcie jednofazowe na słupie kablowym R

$$IR_{sc} = 2194 - 23102 \cdot i$$

$$I_{R30L} = 1845 - 20770 \cdot i$$

$$I_{R30R} = (-195 + 1761 \cdot i) \cdot (-1)$$

$$r_{RE_L} = 1 - \mu_K = 0,0185 - 0,1002 \cdot i$$

$$r_{RE_R} = 1 - \mu_L = 0,51 - 0,1 \cdot i$$

$$IR_{3F} = 20900 \cdot e \quad 1 \cdot i \cdot \left((-87) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \quad \text{prąd zwarcia trójfazowego (A)}$$

impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej dwutorowej (Ω)

$$Z_{inf} = \frac{1}{2} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EE} + \sqrt{a_{av} \cdot Z_{EE} \cdot \left(a_{av} \cdot Z_{EE} + 4 \cdot R_{ETL} \right)} \right) = 1,03 + 0,76 \cdot i$$

$$|Z_{inf}| = 1,28$$

impedancja schematu drabinkowego linii kablowej w układzie CB (Ω) wg iec 60909-3

$$Z_R = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{Z_{inf}}} = 0,92 + 0,52 \cdot i$$

$$Z_L = R_{Es} = 0,4$$

$$Z_P = \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es} \cdot 0,5 + \sqrt{\left(\frac{L}{2} \cdot Z_{3Es} \cdot 0,5\right)^2 + \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es} \cdot R_{ET3}} = 3,39 + 3,7 \cdot i$$

$$k = 1 + \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es} \cdot \left(\frac{1}{R_{ET3}} + \frac{1}{Z_P}\right) = 1,34 + 0,37 \cdot i$$

$$Z_{PR} = \frac{\left(Z_P \cdot (Z_L + Z_P) \cdot (k^2) + \left(Z_P \cdot \left(Z_L - Z_P + 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es}\right) - \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es} \cdot \left(Z_L + \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es}\right)\right) \cdot k^{-2}\right)}{\left(Z_L + Z_P\right) \cdot k^2 - \left(Z_L - Z_P + \frac{L}{2} \cdot Z_{3Es}\right) \cdot k^{-2}} =$$

$$= 2,15 + 4,18 \cdot i$$

wypadkowa impedancja układu uziemiającego dla słupa R (Ω)

$$Z_{ER} = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{Z_{inf}} + \frac{1}{Z_{PR}}} = 0,72 + 0,51 \cdot i$$

prąd uziomowy (sumaryczny) przy zwarcie na słupie kablowym R

$$I_{ER} = r_{RE_L} \cdot I_{R30L} + r_{RE_R} \cdot I_{R30R} = -2129,49 - 1487,52 \cdot i$$

$$|I_{ER}| = 2597,59$$

napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R (Ω)

$$U_{ER} = I_{ER} \cdot Z_{ER} = -777,57 - 2159,87 \cdot i$$

$$|U_{ER}| = 2295,58$$

prąd uziomowy słupa kablowego R

$$I_{ETR} = \frac{U_{ER}}{R_r} = -155,51 - 431,97 \cdot i \quad |I_{ETR}| = 459,12 \quad \arg(I_{ETR}) = -109,8^\circ$$

Wyznaczenie prądu uziomowego oraz wartości prądów w żyłach powrotnych kabli wg wytycznych PSE

$$I_{gR} = \frac{I_{R_{sc}} \cdot (Z_{3Es} - Z_{L3E}) \cdot L}{Z_{3Es} \cdot L + Z_R + Z_L} = -1615,34 - 980,67 \cdot i \quad |I_{gR}| = 1889,71$$

NAPIĘCIE NA ŻYŁACH POWROTNYCH PRZY ZWARCIU JEDNOFAZOWYM POZA LINIĄ KABLOWĄ

Całkowity prąd w żyłach powrotnych kabli (A)

$$I_{pR} = IR_{sc} - I_{gR} = 3809,34 - 22121,33 \cdot i \quad \text{zakłada się przepływ całości prądu zwarciowego przez zastępczy przewód powrotny}$$

strata napięcia na żyłach powrotnej kabla (V)

$$\Delta U_{Rp} = \left(\frac{I_{pR}}{3} \cdot (Z_{EEC} + 2 \cdot Z_{mc}) \cdot \frac{L}{n_{CB}} - IR_{sc} \cdot Z_{LEC} \cdot \frac{L}{n_{CB}} \right) = -1048,11 - 428,57 \cdot i$$

$$|\Delta U_{Rp}| = 1132,35$$

Napięcie na ogranicznikach przepięć SVL przy zwarciu jednofazowym zewnętrznym (V)

$$ZU_{i22} = (U_{ER} - \Delta U_{Rp}) = 270,54 - 1731,3 \cdot i$$

$$\boxed{|ZU_{i22}| = 1752,31} \quad \arg(ZU_{i22}) = -81,12^\circ$$

NAPIĘCIE NA ŻYŁACH POWROTNYCH PRZY OBCIĄŻENIU ROBOCZYM LUB PRZY ZWARCIU RÓJFAZOWYM POZA LINIĄ KABLOWĄ

Napięcie jednostkowe w miejscu krzyżowania żył powrotnych (V/km)

$$E'_p = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{D_1}{d_p} \right) \right) \cdot 10^{-4} = 0,05$$

$$E'_p = 0,145 \cdot \left(\lg \left(2 \cdot \frac{D_1}{d_p} \right) \right) = 0,05$$

Napięcie w miejscu krzyżowania żył powrotnych - obciążenie robocze 830 A w (V)

$$U_{LE} = 830 \cdot E'_p \cdot \frac{L}{n_{CB}} = 41,88$$

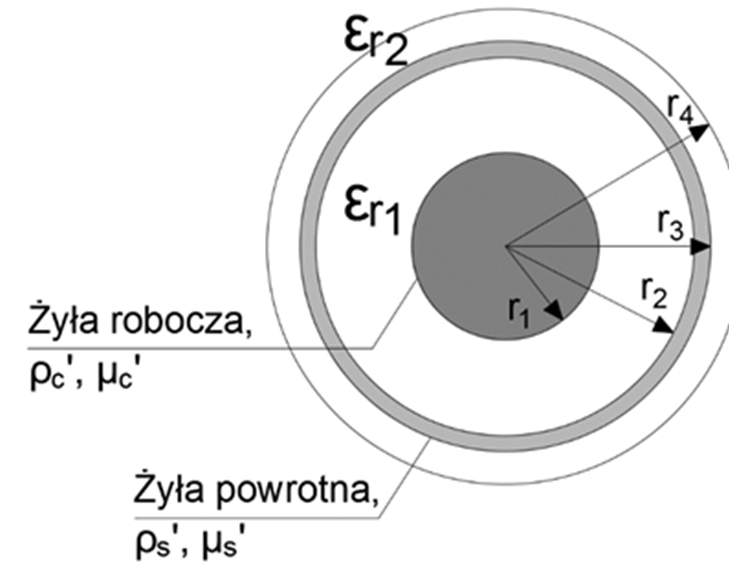
Napięcie w miejscu krzyżowania żył powrotnych - zwarcie trójfazowe (V)

$$U_{3LE} = IR_{3F} \cdot E'_p \cdot \frac{L}{n_{CB}} = 55,2 - 1053,2 \cdot i$$

$$|U_{3LE}| = 1054,64 \quad \arg(U_{3LE}) = -87^\circ$$

Specyfikacja parametrów kabla 110 kV oraz dane podstawowe linii kablowej

| | | |
|--|--|--|
| $d_{\dot{z}r} = 35 \text{ mm}$ | średnica żyły roboczej | |
| $g_{er} = 1,15 \text{ mm}$ | grubość ekranu półprzewodzącego na żyły roboczej | |
| $g_{izol} = 15 \text{ mm}$ | grubość izolacji | |
| $d_{izol} = 67,3 \text{ mm}$ | średnica na izolacji | |
| $g_{eizol} = 1 \text{ mm}$ | grubość ekranu na izolacji | |
| $g_{tp} = 2 \cdot 0,35 \text{ mm} = 0,0007 \text{ m}$ | grubość taśmy półprzewodzącej blokującej wodę | |
| $rd = \frac{1,44}{2} \text{ mm} = 0,00072 \text{ m}$ | promień drutu miedzianego wchodzącego w skład żyły powrotnej | |
| $d_{\dot{z}p} = 72,8 \text{ mm}$ | średnica na żyły powrotnej | |
| $g_{tpw} = 2 \cdot 0,35 \text{ mm} = 0,0007 \text{ m}$ | grubość taśmy półprzewodzącej blokującej wodę | |
| $g_{AL} = 0,2 \text{ mm}$ | grubość taśmy AL | |
| $d_{AL} = 74,5 \text{ mm}$ | średnica na taśmie aluminiowej | |
| $g_{pzew} = 3,6 \text{ mm}$ | grubość powłoki zewnętrznej | |
| $d_k = 82 \text{ mm}$ | średnica kabla | |
| $R_{dc_c} = 0,0221 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc żr | |
| $R_{dc_s_CU} = 0,188 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc żp | |
| $R_{dc_s_AL} = 0,560 \frac{\Omega}{\text{km}}$ | maksymalna rezystancja dc taśmy AL | |
| $As = 95 \text{ mm}^2$ | nominalny przekrój żp | |
| $Ac = 800 \text{ mm}^2$ | nominalny przekrój żr | |
| $l = 1000 \text{ m}$ | długość referencyjna linii kablowej | |
| $L_{sek} = 950 \text{ m}$ | długość sekcji CB w [m] | |
| $Ck = 0,225 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$ | pojemność kabla | |
| $L = 2 \cdot 3 \cdot L_{sek} = 5700,00 \text{ m}$ | całkowita długość linii kablowej | |
| $f = 50 \text{ Hz}$ | $n_c = 6$ | liczba przewodów fazowych |
| $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314,2 \text{ Hz}$ | $n = n_c \cdot 2 + 1 = 13$ | liczba przewodników, 6 fazowych, 6 ekranów, 1 ziemia |
| $\rho_e = 100 \frac{\Omega \cdot \text{m}}$ | $l_{sek} = 6$ | liczba sekcji CB |
| $R'e = \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} = 4,935 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{m}}$ | | |



$$r1 = \frac{d_{\dot{z}r}}{2} = 0,0175 \text{ m}$$

$$r2 = \left(\frac{d_{izol}}{2} + g_{eizol} + g_{tp} \right) = 0,03535 \text{ m}$$

$$r_w = r2 + 2 \cdot rd = 0,03679 \text{ m}$$

$$r3 = \frac{d_{AL}}{2} = 0,0372 \text{ m} \quad r = \frac{r2}{r3} = 0,949$$

$$r4 = \frac{d_k}{2} = 0,04100 \text{ m}$$

$$r_s = \frac{(r3 - r2)}{2} + r2 = 0,03630 \text{ m}$$

$$\text{współczynnik wypełnienia dla } \dot{z}p = \frac{-\left(0,25 - r^2 + r^4 \cdot (0,75 - \log_e(r))\right)}{(1 - r^2)^2} = 0,98315$$

$$Z_{inf} = 1,0307 + 0,7633 \cdot i \quad \text{impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej dwutorowej } (\Omega)$$

$$Z_{infb2} = 1,1761 + 0,7597 \cdot i \quad \text{impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej jednotorowej B2 } (\Omega)$$

$$Z_{infs24} = 1,2621 + 0,8433 \cdot i \quad \text{impedancja schematu drabinkowego linii napowietrznej jednotorowej S24 } (\Omega)$$

$$R_x = 5 \quad \text{rezystancja uziemienia słupa kablowego na prawym końcu linii kablowej } (\Omega)$$

$$R_l = 0,4 \quad \text{rezystancja uziemienia słupa kablowego na lewym końcu linii kablowej } (\Omega)$$

$$Z_R = R_x = 5,000000$$

wypadkowa impedancja systemu uziemień po prawej stronie linii kablowej (Ω)

$$Z_L = R_l = 0,400000$$

wypadkowa impedancja systemu uziemień po lewej stronie linii kablowej (Ω)

$$Z_r = (Z_R) \Omega \quad Z_l = (Z_L) \Omega$$

$$De = \frac{1,85}{\sqrt{\omega \cdot \frac{\mu_0}{\rho e}}} = 931,1 \text{ m}$$

$$a = \exp\left(i \cdot \frac{120}{180} \cdot \pi\right) = -0,5 + 0,866 \cdot i \quad \text{operator obrotu } a$$

$$\alpha = 0,779$$

$$rcov = 1000 \text{ m}$$

współczynnik wypełnienia dla żr

promień fikcyjnego cylindra

$$Ze1 = \frac{Zl}{L} = 7,018 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$Ze2 = \frac{Zr}{L} = 0,0009 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

Impedancje lewa i prawa przeskalowane względem długości linii kablowej na (Ω/m)

Wyznaczenie macierzy modelu wielofazowego linii kablowej

$$Ze = (R'e + Ze1 + Ze2) = 0,001 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$poz = 0,435 \text{ m} \quad gle1 = 1,2 \text{ m} + r4 = 1,241 \text{ m}$$

$$odl = 2 \text{ m} \quad gle2 = gle1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r4 \cdot 2 = 1,312 \text{ m}$$

$$x1 = \begin{bmatrix} poz - r4 \\ poz \\ poz + r4 \\ poz - r4 + odl \\ poz + odl \\ poz + r4 + odl \\ poz - r4 \\ poz \\ poz + r4 \\ poz - r4 + odl \\ poz + odl \\ poz + r4 + odl \\ 1 \text{ m} + poz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,394 \text{ m} \\ 0,435 \text{ m} \\ 0,476 \text{ m} \\ 2,394 \text{ m} \\ 2,435 \text{ m} \\ 2,476 \text{ m} \\ 0,394 \text{ m} \\ 0,435 \text{ m} \\ 0,476 \text{ m} \\ 2,394 \text{ m} \\ 2,435 \text{ m} \\ 2,476 \text{ m} \\ 1,435 \text{ m} \end{bmatrix} \quad y1 = \begin{bmatrix} gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ gle2 \\ gle1 \\ gle2 \\ De \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 1,241 \text{ m} \\ 1,312 \text{ m} \\ 931,0904 \text{ m} \end{bmatrix}$$

Macierze współrzędnych pozycji poszczególnych przewodników - C1-C3, C4-C6, S1-S3, S4-S6, ziemia

$$gm = \begin{bmatrix} r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ r1 \cdot \alpha \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ rs \cdot \alpha p \\ De \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,014 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 0,036 \text{ m} \\ 931,09 \text{ m} \end{bmatrix}$$

```

for k1 ∈ [1..n]
  for k2 ∈ [1..n]
    if ((k1 = k2))
      gk1 k2 = gmk1
    else
      gk1 k2 = √((x1k1 - x1k2)2 + (y1k1 - y1k2)2)

for k1 ∈ [1..n]
  for k2 ∈ [1..n]
    if (((|k1 - k2| = n_c) ∧ (k1 < n)) ∧ (k2 < n))
      gk1 k2 = rs
    else
      gk1 k2 = gk1 k2

```


Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu jednofazowym na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 2194 - 23109 \cdot i \\ 4 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ 8 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 5 \cdot 10^{-13} - 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 205 + 604 \cdot i \\ 15987 - 6039 \cdot i \\ 855 - 4517 \cdot i \\ 849 - 4495 \cdot i \\ 142 + 3106 \cdot i \\ 132 + 3129 \cdot i \\ 128 + 3152 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 2194 - 23109 \cdot i \\ 4 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} \cdot i \\ 0 \\ 8 \cdot 10^{-13} + 6 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 5 \cdot 10^{-13} - 7 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ -1766 + 7226 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 966 + 275 \cdot i \\ 205 + 604 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 15987 - 6039 \cdot i \\ 855 - 4517 \cdot i \\ 849 - 4495 \cdot i \\ 142 + 3106 \cdot i \\ 132 + 3129 \cdot i \\ 128 + 3152 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \\ 1167 + 3430 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na źr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na źr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na źr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 638 \text{ A} \quad \arg(VAR_{13}) = 71^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm}| = 3188 \text{ V} \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarciu dwufazowym z ziemią na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} -263 + 23101 \cdot i \\ 20138 - 11323 \cdot i \\ 0 \\ -6 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 6 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -620 - 64 \cdot i \\ -11119 + 5489 \cdot i \\ 13556 + 14248 \cdot i \\ 3726 + 2718 \cdot i \\ -2772 - 1152 \cdot i \\ -2786 - 1166 \cdot i \\ -2811 - 1191 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} -263 + 23101 \cdot i \\ 20138 - 11323 \cdot i \\ 0 \\ -6 \cdot 10^{-13} + 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 6 \cdot 10^{-13} + 7 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 0 \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -5738 - 4661 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -680 + 756 \cdot i \\ -620 - 64 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} -11119 + 5489 \cdot i \\ 13556 + 14248 \cdot i \\ 3726 + 2718 \cdot i \\ -2772 - 1152 \cdot i \\ -2786 - 1166 \cdot i \\ -2811 - 1191 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \\ -3523 - 363 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na źr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na źr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na źr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na źr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 623 \text{ A} \quad \arg(VAR_{13}) = -174^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_r \text{ ohm}| = 3117 \text{ V} \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_r \text{ ohm} - \Delta U_{p72} \right) = (1207 + 2483 \cdot i) \text{ V} \quad |U_{i22}| = 2760 \text{ V} \quad \arg(U_{i22}) = 64^\circ$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_r \text{ ohm} + \Delta U_{p72} \right) = (-2946 + 277 \cdot i) \text{ V} \quad |U_{i22}| = 2959 \text{ V} \quad \arg(U_{i22}) = 175^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarceniu dwufazowym na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} -9991 + 15094 \cdot i \\ 9991 - 15094 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} - 6 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} - 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ 11 - 11 \cdot i \\ 11 - 11 \cdot i \\ 11 - 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ 10 + i \\ -10913 - 4499 \cdot i \\ 11002 + 4538 \cdot i \\ 44 + 19 \cdot i \\ 72 - 4 \cdot i \\ 76 - i \\ 67 - 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} -9991 + 15094 \cdot i \\ 9991 - 15094 \cdot i \\ 0 \\ 2 \cdot 10^{-13} - 6 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ -2 \cdot 10^{-13} - 5 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ 11 - 11 \cdot i \\ 11 - 11 \cdot i \\ 11 - 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ -14 + 11 \cdot i \\ 10 + i \\ -10913 - 4499 \cdot i \\ 11002 + 4538 \cdot i \\ 44 + 19 \cdot i \\ 72 - 4 \cdot i \\ 76 - i \\ 67 - 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} -10913 - 4499 \cdot i \\ 11002 + 4538 \cdot i \\ 44 + 19 \cdot i \\ 72 - 4 \cdot i \\ 76 - i \\ 67 - 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \\ 56 + 7 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 10 A \quad \arg(VAR_{13}) = 8^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \text{ ohm}| = 50 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} - \Delta Up72 \right) = (-694 - 480 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 844 V \quad \arg(U_{i22}) = -145^\circ$$

Wzrost lokalnego potencjału ziemi przy zwarceniu trójfazowym z ziemią na słupie kablowym R

$$VAR = Q^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} 1257 - 20824 \cdot i \\ -18663 + 9323 \cdot i \\ 17406 + 11501 \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} - 3 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-13} + 4 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -12 + 16 \cdot i \\ 13460 - 1756 \cdot i \\ -8421 - 10759 \cdot i \\ -5276 + 12693 \cdot i \\ -69 + 137 \cdot i \\ -68 + 126 \cdot i \\ -59 + 132 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \end{bmatrix}$$

for $k1 \in [1..n]$
 $I_{k1} = VAR_{k1}$

$$I = \begin{bmatrix} 1257 - 20824 \cdot i \\ -18663 + 9323 \cdot i \\ 17406 + 11501 \cdot i \\ -1 \cdot 10^{-13} - 3 \cdot 10^{-14} \cdot i \\ 2 \cdot 10^{-13} + 4 \cdot 10^{-13} \cdot i \\ 0 \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ 0 \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ 9 + 31 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -5 - 36 \cdot i \\ -12 + 16 \cdot i \\ 13460 - 1756 \cdot i \\ -8421 - 10759 \cdot i \\ -5276 + 12693 \cdot i \\ -69 + 137 \cdot i \\ -68 + 126 \cdot i \\ -59 + 132 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \end{bmatrix}$$

prąd fazy a - tor 1
 prąd fazy b - tor 1
 prąd fazy c - tor 1
 prąd fazy a - tor 2
 prąd fazy b - tor 2
 prąd fazy c - tor 2
 prąd żp fazy a - tor 1
 prąd żp fazy b - tor 1
 prąd żp fazy c - tor 1
 prąd żp fazy a - tor 2
 prąd żp fazy b - tor 2
 prąd żp fazy c - tor 2
 prąd doziemny

for $k1 \in [14..m]$
 $V_{k1-13} = VAR_{k1}$

$$V = \begin{bmatrix} 13460 - 1756 \cdot i \\ -8421 - 10759 \cdot i \\ -5276 + 12693 \cdot i \\ -69 + 137 \cdot i \\ -68 + 126 \cdot i \\ -59 + 132 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \\ -70 + 93 \cdot i \end{bmatrix}$$

spadek napięcia na żr fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żr fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żr fazy c - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 1
 spadek napięcia na żp fazy a - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy b - tor 2
 spadek napięcia na żp fazy c - tor 2
 spadek napięcia na fikcyjnym przewodzie powrotnym

$$|VAR_{13} A| = 20 A \quad \arg(VAR_{13}) = 127^\circ$$

$$|VAR_{13} A \cdot R_f \text{ ohm}| = 102 V \quad \text{Napięcie układu uziemiającego - ziemia lokalna - słup R}$$

□

Napięcie na ogranicznikach przepięć

$$U_{i22} = \left((VAR_{13}) A \cdot R_f \text{ ohm} - \Delta Up72 \right) = (403 + 973 \cdot i) V \quad |U_{i22}| = 1054 V \quad \arg(U_{i22}) = 67^\circ$$