



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT

Analiza czynników determinujących rozptyw prądu
zwarcia dla oceny bezpieczeństwa porażeniowego
w stacji elektroenergetycznej

Autor: mgr inż. Jakub Szymon Gajdzica

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Tarko

Praca wykonana:
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023

1 Teza i cel rozprawy

Ważność zagadnień związanych z bezpieczeństwem porażeniowym oraz jednocześnie brak uznanych i zaawansowanych metod wyznaczania rozpliwów prądów zwarć jednofazowych w stacjach elektroenergetycznych, stanowił motywację do podjęcia badań w tym obszarze. W rozprawie sformułowano następującą tezę:

Poprawna ocena bezpieczeństwa porażeniowego w stacjach elektroenergetycznych uwarunkowana jest zastosowaniem zaawansowanych modeli elementów układu elektroenergetycznego determinujących rozpliw prądu zwarcia jednofazowego oraz metod jego wyznaczania.

Głównym celem badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej rozprawie, było opracowanie zaawansowanej metody symulacyjnej wyznaczania rozpliwu prądu zwarcia doziemnego, pozwalającej na kompleksowe określenie zagrożenia porażeniowego, nie tylko na terenie stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia dotkniętej zakłóceniem, ale również poza jej obszarem. Realizacja założonego celu wymagała opracowania modeli cząstkowych poszczególnych elementów układu elektroenergetycznego i określenia wpływu ich parametrów na rozpliw prądu zwarciego w sieci elektroenergetycznej. Zaproponowana metoda została wykorzystana do analiz stanów zwarciegowych w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej, a uzyskane wyniki prądów zwarciegowych i napięć uziomowych porównano z wynikami otrzymanymi na podstawie obliczeń przeprowadzonych zgodnie z obowiązującymi zaleceniami normatywnymi.

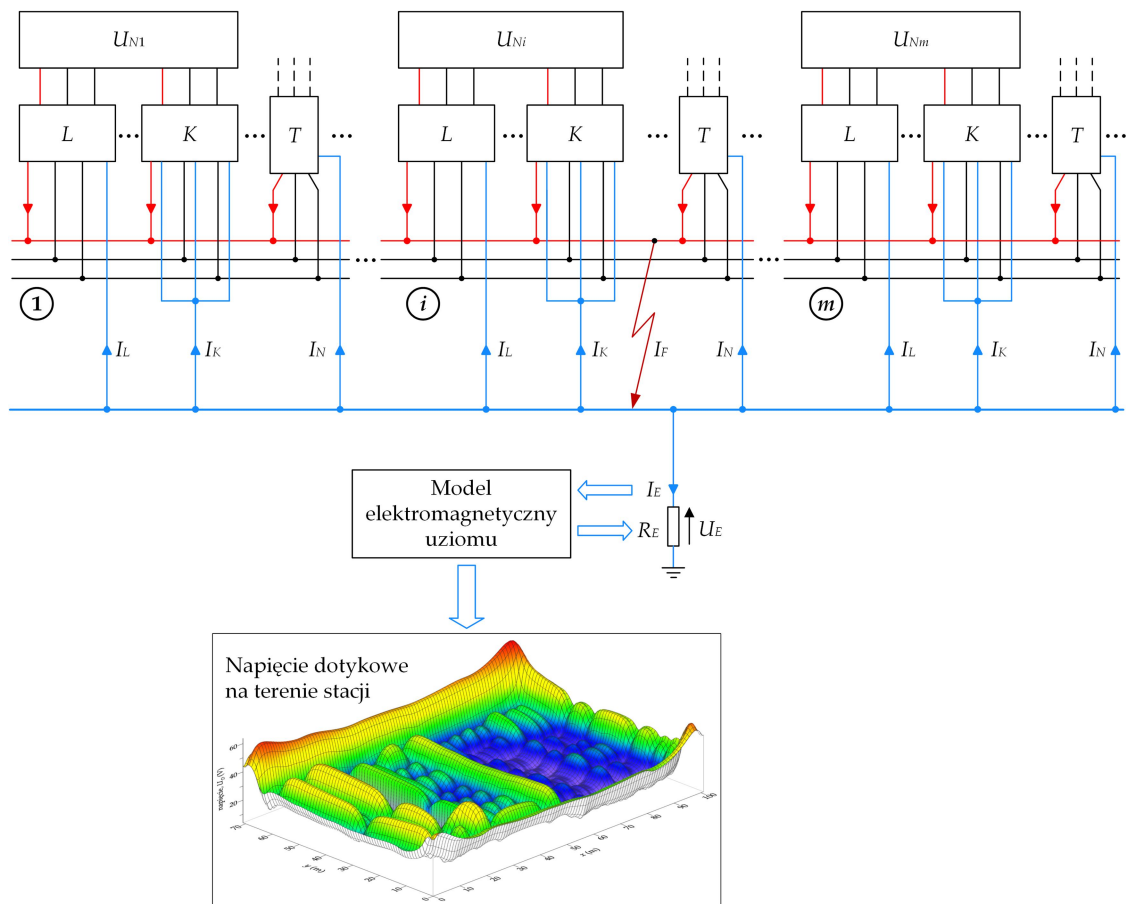
2 Zakres rozprawy

W rozprawie doktorskiej, w oparciu o obowiązujące uwarunkowania normatywne przedstawiono metodykę wyznaczania rozpliwu prądu zwarcia, będącego jednym z niezbędnych etapów dla oceny zagrożenia porażeniowego na terenie stacji elektroenergetycznej. Wskazano na konieczność właściwego odwzorowania takich elementów jak układ uziomowy stacji elektroenergetycznej, transformatory oraz linie napowietrzne i kablowe. Złożona struktura systemu elektroenergetycznego sprawia, że opis matematyczny zjawisk zachodzących podczas zwarć jest skomplikowany. Z tego powodu zastosowanie do analizy rozpliwu prądu zwarciego w stacjach elektroenergetycznych zaawansowanych metod symulacji – uwzględniających dokładne modele czynników determinujących ten rozpliw – jest niezbędne.

Badania z wykorzystaniem opracowanej metody symulacyjnej wyznaczania rozpliwu prądu zwarcia doziemnego w stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia przeprowadzono z wykorzystaniem modeli cząstkowych poszczególnych elementów rozpatrywanych sieci 110 kV i 15 kV z wykorzystaniem programu symulacyjnego EMTP-ATP.

Założono, że stacja składa się z m rozdzielni o napięciach znamionowych U_{Ni} ($i = 1, \dots, m$). Do szyn rozdzielni przyłączone są linie napowietrzne L oraz linie kablowe K sieci o napięciach znamionowych U_N , a także transformatory T łączące szyny zbiorcze rozdzielni o różnych napięciach znamionowych. Należy zaznaczyć, że sekcjonowane podłużnie szyny zbiorcze traktowane są jako niezależne rozdzielnie.

W przedmiotowej stacji analizuje się jednofazowe zwarcie doziemne w jednej z rozdzielni (na rys. 2.1 w i -tej rozdzielni). Jego wystąpienie wywołuje przepływ prądów wymuszonych przez wszystkie źródła zasilające miejsce zwarcia. Skutkuje to przepływem prądów zwarciovych nie tylko liniami L i K przyłączonymi do uszkodzonej rozdzielni, ale również – poprzez transformatory T – wymusza przepływ prądów zwarciovych w pozostałych rozdzielniach. W miejscu zwarcia prąd I_F rozplywa się do uziomu rozważanej stacji (prąd I_E) oraz pomiędzy punkty neutralne transformatorów (prądy I_N), przewody odgromowe linii napowietrznych (prądy I_L) i żyły powrotne linii kablowych (prądy I_K).



Rys. 2.1. Modelu do badania rozplywu prądu zwarcia w stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia

m – liczba rozdzielni; U_N – napięcia znamionowe sieci; L – linie napowietrzne; K – linie kablowe; T – transformatory; R_E – rezystancja uziomu stacji; I_F – prąd w miejscu zwarcia; U_E – napięcie uziomowe; I_E – prąd zwarciovych spływający do uziomu stacji; I_L, I_K, I_N – prądy zwarciovych odpływające do przewodów odgromowych linii napowietrznych (L), żył powrotnych kabli (K) oraz punktów gwiazdowych transformatorów (N)

Model uziomu stacji opracowano na podstawie teorii pola elektromagnetycznego, wykorzystując do formułowania równań matematycznych metodę prądów symulowanych. Algorytm dla rozwiązywania tych równań zrealizowano w postaci skryptu obliczeniowego w środowisku MATLAB. Rezystancję układu uziomowego złożonego z n odcinków wyznacza się formułując dla niego równania, które na podstawie zasady superpozycji potencjału wyrażają związek pomiędzy natężeniami prądów wpływającymi z odcinków uziomu do gruntu, a potencjałami tych odcinków. Opracowany model pozwala również uwzględnić uziomy pionowe połączone z kratą uziomową. Drugą funkcjonalnością modelu i opracowanego skryptu jest obliczanie, dla wyznaczonej z analizy rozptylowej wartości prądu uziomowego, potencjałów w otoczeniu uziomu oraz napięć dotykowych na terenach badanych stacji.

Modele matematyczne transformatorów energetycznych opracowano jako modele obwodowe formułując równania matematyczne, wyrażające związki pomiędzy napięciami na zaciskach uzwojeń i prądami do nich dopływającymi. Rozważono transformatory trójuzwojeniowe i dwuuzwojeniowe o najczęściej spotykanych w praktyce konfiguracjach. Dla modeli tych poczyniono niezbędne założenia upraszczające, takie jak: symetria uzwojeń fazowych i budowy obwodu magnetycznego, liniowość obwodów magnetycznych i elektrycznych, zaniedbanie strat w rdzeniu oraz pojemności uzwojeń transformatora.

Modele napowietrznych linii elektroenergetycznych opracowano jako modele linii jednorodnych oraz wielofazowych linii niejednorodnych. Dla linii jednorodnych założono jednakową długość przeseł linii i jednakową wartość rezystancji uziomów słupów. Model jest układem liniowym o parametrach skupionych, którymi są tylko parametry podłużne linii określone dla częstotliwości sieciowej i jednorodnej struktury gruntu. Dla modeli uproszczonych linii jedno- i dwutorowych z jednym i dwoma przewodami odgromowymi zbadano wpływ ich parametrów na wartość impedancji dróg ziemopowrotnych.

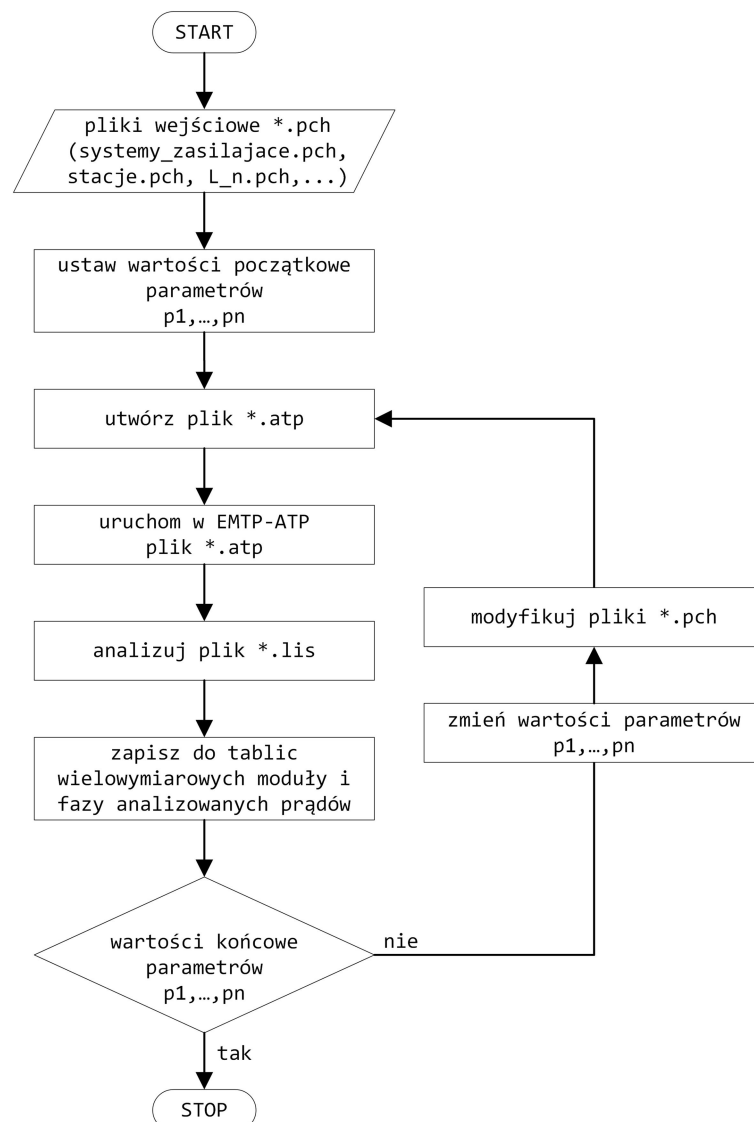
Modele linii kablowych opracowano również jako wyidealizowane modele struktur jednorodnych oraz wielofazowych linii niejednorodnych, rozpatrując odrębnie linie kablowe wysokich napięć i linie kablowe średnich napięć. Linie wysokich napięć z założenia mają strukturę jednorodną, która wynika z zastosowanego w danej linii konfiguracji połączeń żył powrotnych. W przypadku linii kablowych średniego napięcia modele jednorodne są modelami wyidealizowanymi. Dla modeli jednorodnych założenie jednorodności struktury dotyczy odcinków linii kablowych i ewentualnych uzemień żył powrotnych w miejscach łączenia tych odcinków.

Modele wielofazowe opracowano przede wszystkim z myślą ich wykorzystania w programie EMTP-ATP, w celu analizy rozptywu prądów zwarciovych w złożonych strukturach sieci elektroenergetycznych. Pomimo, że w programie EMTP-ATP zaimplementowane są różnorodne i zaawansowane modele linii, to jednak brak jest wśród nich, bezpośrednich modeli, dyskretnych i niejednorodnych struktur linii elektroenergetycznych. Modele takie muszą być w programie tworzone poprzez manualne łączenie poszczególnych elementów składowych. Z tego względu

zdecydowano się na opracowanie zewnętrznego programu w środowisku MATLAB, który umożliwiłby automatyczne tworzenie modeli takich dyskretnych i niejednorodnych struktur linii elektroenergetycznych.

Dla modeli wielofazowych linii napowietrznych przyjmuje się założenia analogiczne jak dla modeli uproszczonych, z tą jednak różnicą, że uwzględnia się wszystkie przewody fazowe oraz parametry poprzeczne w postaci pojemności linii.

Przy opracowaniu modeli wielofazowych linii kablowych zostały przyjęte założenia analogiczne jak dla modeli uproszczonych, z tą jednak różnicą, że uwzględnia się prądy fazowe w żyłach roboczych oraz parametry poprzeczne, którymi są pojemności kabli. Ponadto, w przypadku linii kablowych średniego napięcia założono, że struktura linii jest niejednorodna, tzn. rozważa się odcinki kabli o niejednakowej długości i rezystancje uziomów stacji SN/nn o niejednakowych wartościach.



Rys. 2.2. Algorytm automatycznej symulacji i analizy rozplywu prądów zwarciovych

W celu przeprowadzania wieloparametrycznych symulacji i analiz, opracowano w środowisku MATLAB program, który dla parametrów p_1, \dots, p_n umożliwia wielokrotne tworzenie i modyfikację pliku *.atp, jego przekazanie do wykonania

w programie EMTP-ATP oraz automatyczną analizę rozptyłów prądów zwarciovych zapisywanych w plikach wynikowych *.lis. Algorytm tego programu przedstawiono na rysunku 2.2.

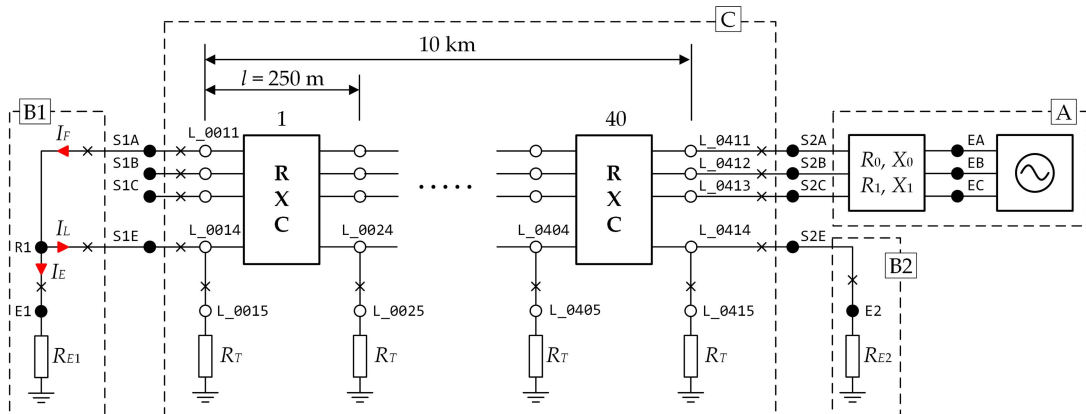
Celem tych badań było wyznaczenie współczynnika rozptywowego k_{RL} , określającego jaka część prądu zwarcia I_F odpływa przewodem odgromowym linii w postaci prądu I_L (rys. 2.3):

$$k_{RL} = \frac{I_L}{I_F} = |k_{RL}| \exp(j\phi_{RL}) \quad (2.1)$$

$$k_{RL} = f(p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (2.2)$$

gdzie:

- p_1 – liczba prześel linii, zmienna w zakresie $20 \div 100$;
- p_2 – rezystancja R_T uziemienia słupów, zmienna w zakresie $5 \div 30 \Omega$;
- p_3 – rezystancja R_{E1} uziomu stacji B1, zmienna w zakresie $0,1 \div 0,5 \Omega$;
- p_4 – rezystancja R_{E2} uziomu stacji B2, zmienna w zakresie $0,1 \div 0,5 \Omega$.



Rys. 2.3. Przykładowy układ elektroenergetyczny z modelem linii do analizy rozptywu prądów zwarciovych w stacji B1: A – model systemu zasilającego; B1, B2 – modele stacji elektroenergetycznych; C – model linii jednotorowej z jednym przewodem odgromowym; I_F – prąd zwarciovych; I_L – prąd odpływający przewodem odgromowym linii; I_E – prąd spływający do uziomu stacji

Dla układu z rysunku 2.3, w którym występującą w bloku C linię napowietrzną zastąpiono linią kablową, przeprowadzono również wieloparametryczne symulacje i analizy, których celem było wyznaczenie współczynnika rozptywowego k_{RK} , określającego jaka część prądu zwarcia I_F odpływa linią kablową w postaci prądu I_K :

$$k_{RK} = \frac{I_K}{I_F} = |k_{RK}| \exp(j\phi_{RK}) \quad (2.3)$$

$$k_{RK} = f(p_1, p_2, p_3) \quad (2.4)$$

gdzie:

- p_1 – długość l_C linii kablowej, zmienna w zakresie $1 \div 10$ km;
- p_2 – rezystancja R_{E1} uziomu stacji B1, zmienna w zakresie $0,1 \div 1,0 \Omega$;
- p_3 – rezystancja R_{E2} uziomu stacji B2, zmienna w zakresie $0,1 \div 1,0 \Omega$.

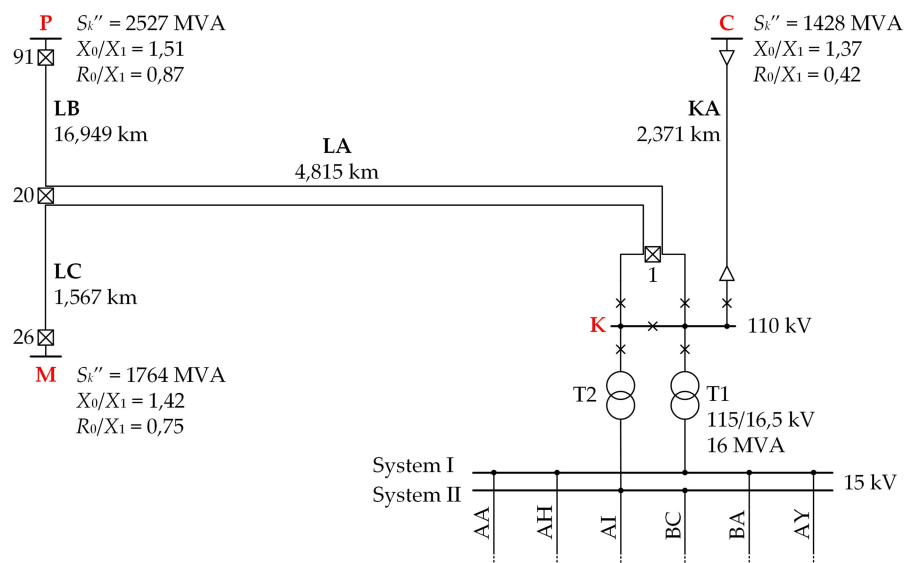
Przyjęty do badań układ linii kablowej średniego napięcia jest analogiczny do układu z rysunku 2.3 z tą różnicą, że w bloku C występuje linia kablowa średniego napięcia. Celem badań było wyznaczenie współczynnika rozptywowego k_{RK} jako funkcji:

$$k_{RK} = f(p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (2.5)$$

gdzie:

- p_1 – długość l_C linii kablowej średniego napięcia, zmienna w zakresie $(1 \div 20) \times 0,25$ km;
- p_2 – rezystancja R_{E1} uziomu stacji B1, zmienna w zakresie $0,1 \div 1,0$ Ω ;
- p_3 – rezystancja R_{E2} uziomu stacji B2, zmienna w zakresie $0,1 \div 1,0$ Ω ;
- p_4 – rezystancje R_B uziemienia stacji SN, zmienna w zakresie $1 \div 10$ Ω .

Praktycznym zastosowaniem opracowanej w rozprawie doktorskiej metody symulacyjnej są badania skutków rozptywu prądu zwarcia w rzeczywistej stacji elektroenergetycznej WN/SN, której układ przedstawiono na rysunku 2.4. Stanowi on fragment sieci rozdzielczej 110 kV, której strukturę tworzą stacje elektroenergetyczne K, M i P połączone ze sobą liniami napowietrznymi LA, LB, LC.

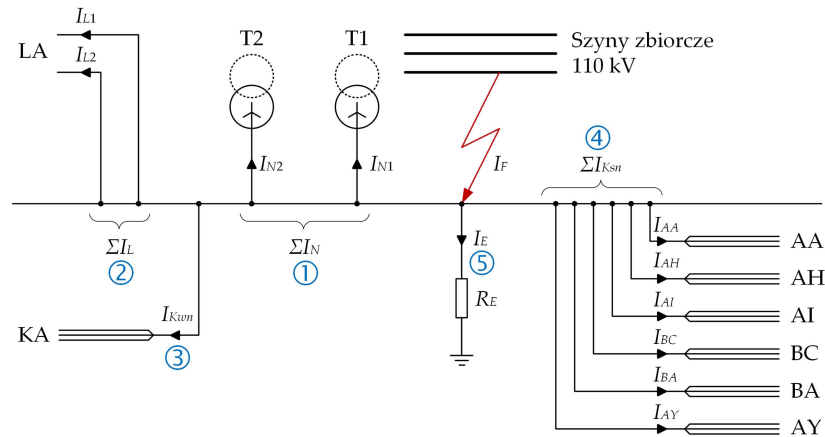


Rys. 2.4. Schemat sieci rozdzielczej 110 kV zasilającej stację elektroenergetyczną K

Sieć ta, docelowo ma zostać rozbudowana o stację C, która ma być połączona ze stacją K linią kablową KA. Stacja K jest połączona ze stacją P torem nr 1 linii LA i jednotorową linią LB oraz ze stacją M torem nr 2 linii LA i jednotorową linią LC. Transformatory T1 i T2 zasilają dwusystemową rozdzielnię 15 kV, do szyn której przyłączone jest sześć linii kablowych (AA, AH, AI, BC, BA, AY). W analizie pominięto przyłączone do rozdzielni 15 kV linie napowietrzne, które nie stanowią dróg ziemnopowrotnych w rozptywie prądu zwarciegowego w analizowanej stacji.

Na rysunku 2.5 przedstawiono schematycznie pięć grup dróg rozptywu prądu zwarcia jednofazowego I_F w stacji K: (1) do punktów gwiazdowych transformatorów T1 i T2, (2) do przewodów odgromowych linii LA, (3) do żył powrotnych linii

kablowej wysokiego napięcia KA, (4) do żył powrotnych linii kablowych średniego napięcia AA...AY oraz (5) do uziomu stacji K.



Rys. 2.5. Schemat rozpyły prądu I_F zwarcia jednofazowego w stacji K

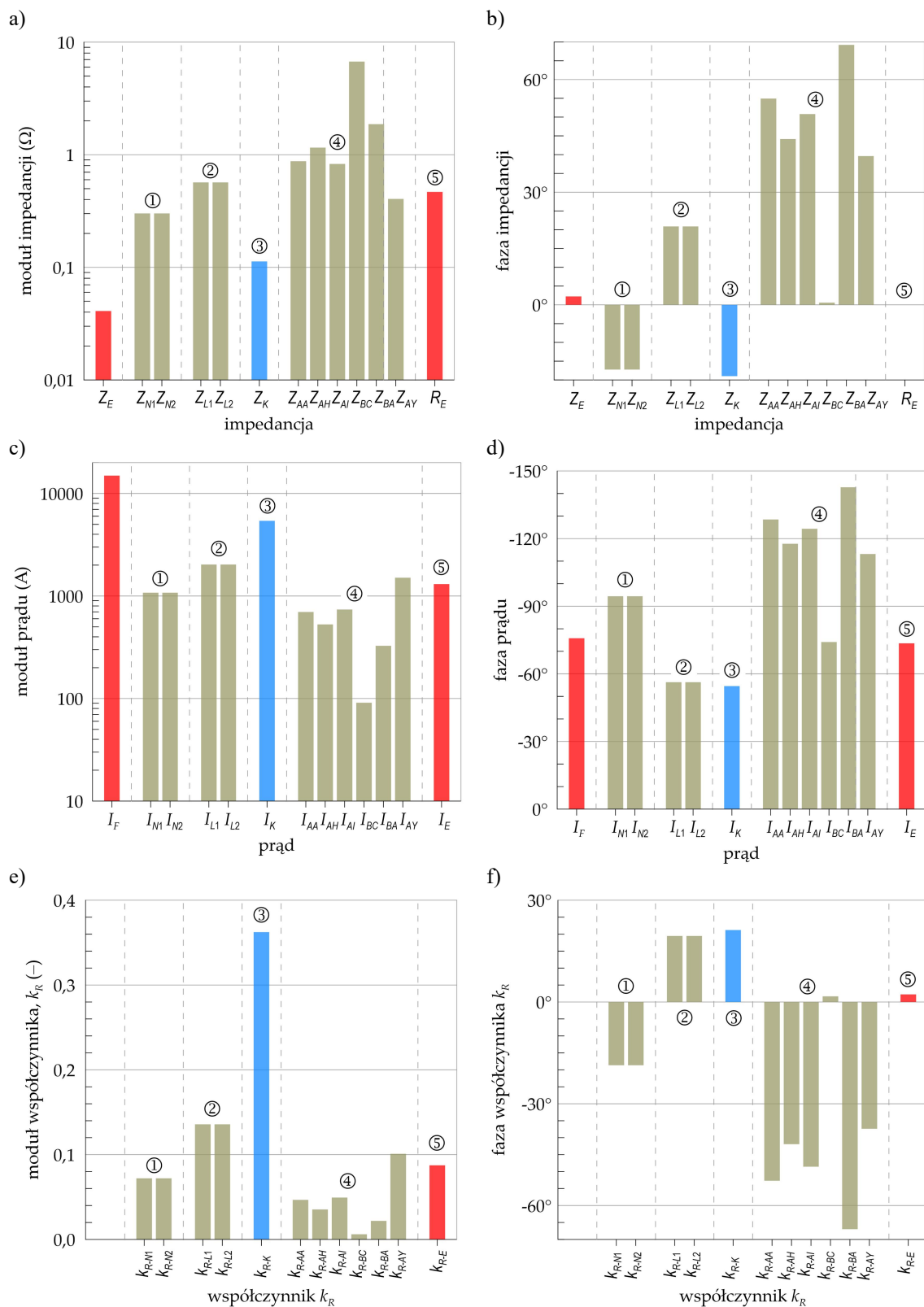
I_{N1}, I_{N2} – prądy odpływające do punktów gwiazdowych transformatorów T1 i T2; I_{L1}, I_{L2} – prądy odpływające przewodami odgromowymi toru 1 i toru 2 linii LA; $I_{AA...AY}$ – prądy odpływające żyłami powrotnymi linii kablowych AA...AY średniego napięcia; I_{Kwn} – prąd odpływający żyłami powrotnymi linii kablowej KA wysokiego napięcia; I_E – prąd wpływający do uziomu stacji; R_E – rezystancja uziomu stacji; ① ② ③ ④ ⑤ – grupy dróg rozpyły prądu zwarciovego

Wartości impedancji dróg rozpyły determinują wartości prądów zwarciovych w nich płynących. Na rysunku 2.6 przedstawiono wartości modułów (rys. 2.6a) i faz (rys. 2.6b) impedancji poszczególnych dróg rozpyły prądów zwarciovych w stanie docelowym stacji K. Na rysunkach 2.6c i 2.6d przedstawiono moduły i fazy tych prądów, natomiast na rysunkach 2.6e i 2.6f moduły i fazy współczynników rozpyłowych:

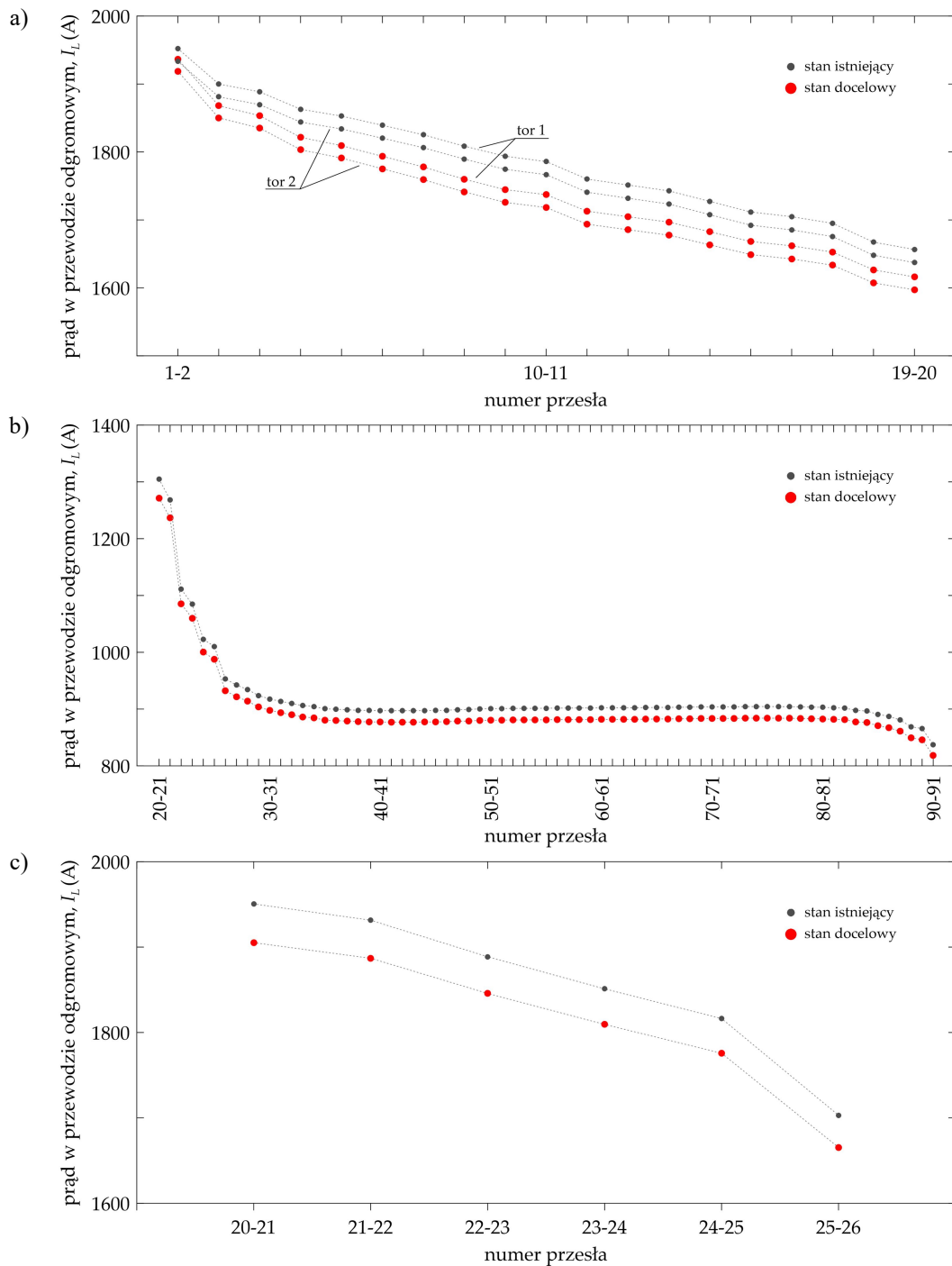
$$k_{R-...} = \frac{I_{...}}{I_F} = |k_{R-...}| \exp(j\varphi_{R-...}) \quad (2.6)$$

Planowane połączenie linią kablową 110 kV stacji K ze stacją C powoduje powstanie kolejnej drogi rozpyły prądu zwarcia, co skutkuje zmianami wartości impedancji powrotnych już istniejących dróg i zmianami rozpyły prądu zwarcia.

Na rysunku 2.7 przedstawiono przykładowe rozpyły prądów zwarciovych w kolejnych odcinkach przewodów odgromowych linii LA, LB oraz LC (dla wartości rezystancji uziemienia R_E w stacji C wynoszącej 0,5 Ω). Wartości prądów w przewodach odgromowych są największe w początkowych przesłach linii i zmniejszą się w miarę oddalania się od stacji K. Połączenie stacji C ze stacją K – pomimo zwiększenia mocy zwarciovwej w stacji K, a tym samym prądu zwarcia – powoduje zmniejszenie wartości prądów zwarciovych w przewodach odgromowych. Wynika to z tego, że w stanie docelowym znaczna część prądu zwarcia odprowadzana będzie ze stacji K żyłami powrotnymi linii kablowej (rys. 2.6).

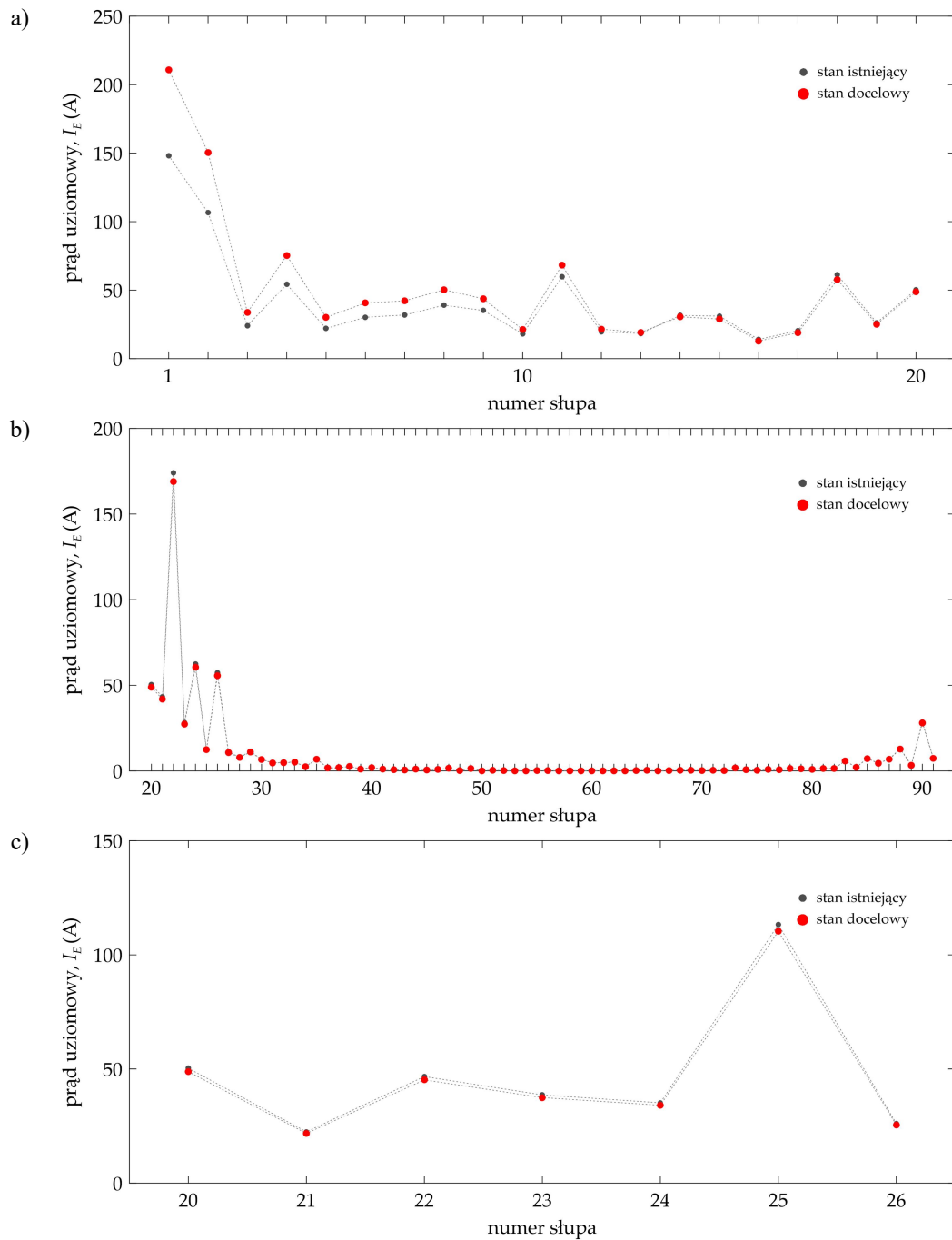


Rys. 2.6. Zależności modułów (a) i faz (b) impedancji, modułów (c) i faz (d) prądów oraz modułów (e) i faz (f) współczynników rozptylowych k_R poszczególnych grup dróg powrotnych rozptyłu prądów zwarcioych w stacji K w stanie docelowym



Rys. 2.7. Wpływ połączenia linią kablową stacji K ze stacją C na rozpływy prądów zwarciovych w kolejnych odcinkach przewodów odgromowych linii LA (a), LB (b) i LC (c)

Znajomość prądów zwarciovych w przewodach odgromowych niezbędna jest dla oceny skutków cieplnych wywołanych przepływami tych prądów. Natomiast prądy zwarciove wpływające do uziomów słupów decydują o zagrożeniu porażeniowym w bezpośrednim otoczeniu konstrukcji wsporczych. Rysunek 2.8 przedstawia wykresy prądów zwarciovych płynących w uziomach kolejnych słupów linii LA, LB i LC dla stanu istniejącego i docelowego stacji K. Stanowią one podstawę wyznaczenia napięć uziomowych konstrukcji wsporczych..



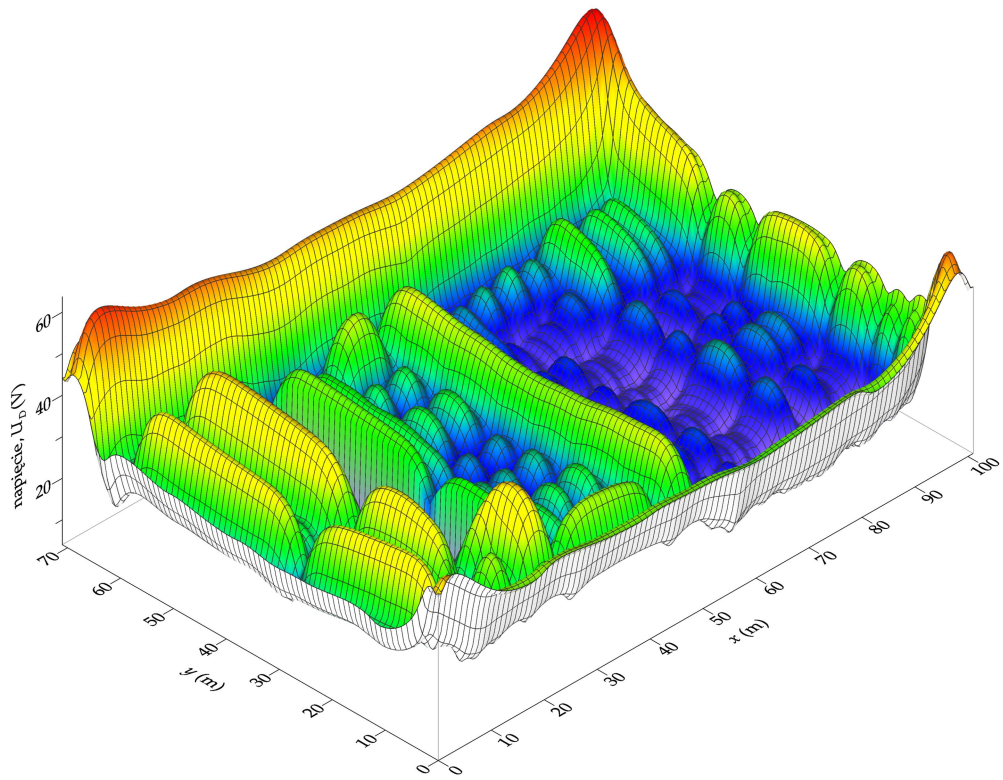
Rys. 2.8. Wpływ połączenia linią kablową stacji K ze stacją C na rozkłady prądów zwarciovych do uziomów kolejnych słupów linii LA (a), LB (b) i LC (c)

W oparciu o elektromagnetyczny model układu uziomowego stacji wyznaczono rozkłady napięć dotykowych U_D na terenie stacji K, które można przedstawić w postaci:

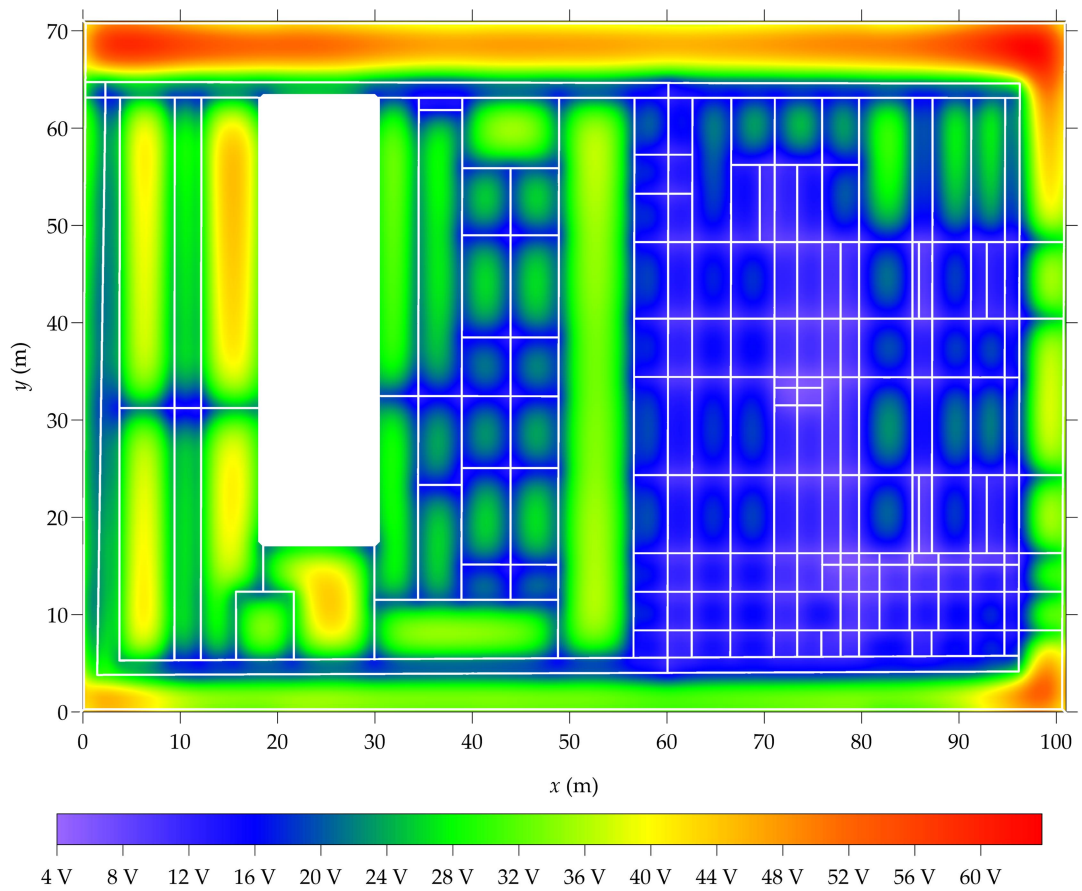
$$U_D(x, y) = I_E R_E - V_U(x, y, 0) \quad (2.7)$$

gdzie: I_E – część prądu zwarcia wpływająca do uziomu stacji K, R_E – rezystancja uziomu stacji K, $V_U(x, y, 0)$ – rozkład potencjału uziomowego na terenie stacji K.

a)



b)



Rys. 2.9. Rozkłady napięcia dotykowego U_D dla uziomu stacji K w stanie docelowym dla rezystancji uziomu R_E stacji C wynoszącej $0,5 \Omega$: a) przestrzenny; b) płaski

Spodziewane rozkłady napięcia dotykowego U_D w stanie docelowym stacji K i założonej rezystancji R_E stacji C wynoszącej $0,5 \Omega$ przedstawiono, w postaci przestrzennej oraz w postaci płaskiej, na rysunku 2.9a oraz 2.9b. Rozkłady napięć wywołane są w tym przypadku przepływem prądu I_E o wartości 1306 A. Wartości napięć U_D zawierają się w przedziale $5,71 \div 63,76$ V. Najmniejsze wartości napięć występują na obszarach największego zagęszczenia oczek kraty uziomowej, a największe – w obszarach narożnych kraty uziomowej.

Metoda symulacyjna umożliwiła także zbadanie skutków rozplywu prądu zwarcia w zasilanej z tej stacji sieci średniego napięcia. Wyniki otrzymanych analiz zwarciovych porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą obliczeń wykonanych zgodnie z obowiązującymi normami.

Wyniki analizy napięć wyniesionych ze stacji K do sieci 15 kV, które stanowią wartości napięć uziomowych w poszczególnych stacjach 15/0,4 kV przedstawiono na rysunku 2.10. Wartości te wyznaczono dla stanu istniejącego oraz dla stanu docelowego przy rezystancji uziemienia $R_E = 0,5 \Omega$ w stacji C. Największe napięcia wyniesione występują w pierwszych stacjach (S01, S14, S16, S04 oraz S52) od strony zasilania. W stanie istniejącym wynoszą one od 81 V (stacja S04) do 348 V (stacja S52), co stanowi odpowiednio 18,9% oraz 80,9% napięcia uziomowego 430 V występującego w stacji K (GPZ 110/15 kV). W kolejnych stacjach wartości napięć wyniesionych maleją w miarę oddalania się od stacji K, osiągając w głębi sieci SN wartości nawet poniżej 1 V. W stanie docelowym wartości napięć wyniesionych są większe (rys. 2.10), przy czym wzrost ten jest jednakowy we wszystkich stacjach 15/0,4 kV i wynosi około 1,42 razy.

Wyniki obliczeń wybranych wielkości zwarciovych, wyznaczonych przy zastosowaniu zaproponowanych w rozprawie modeli oraz metody normatywnej zestawiono w tabeli 2.1.

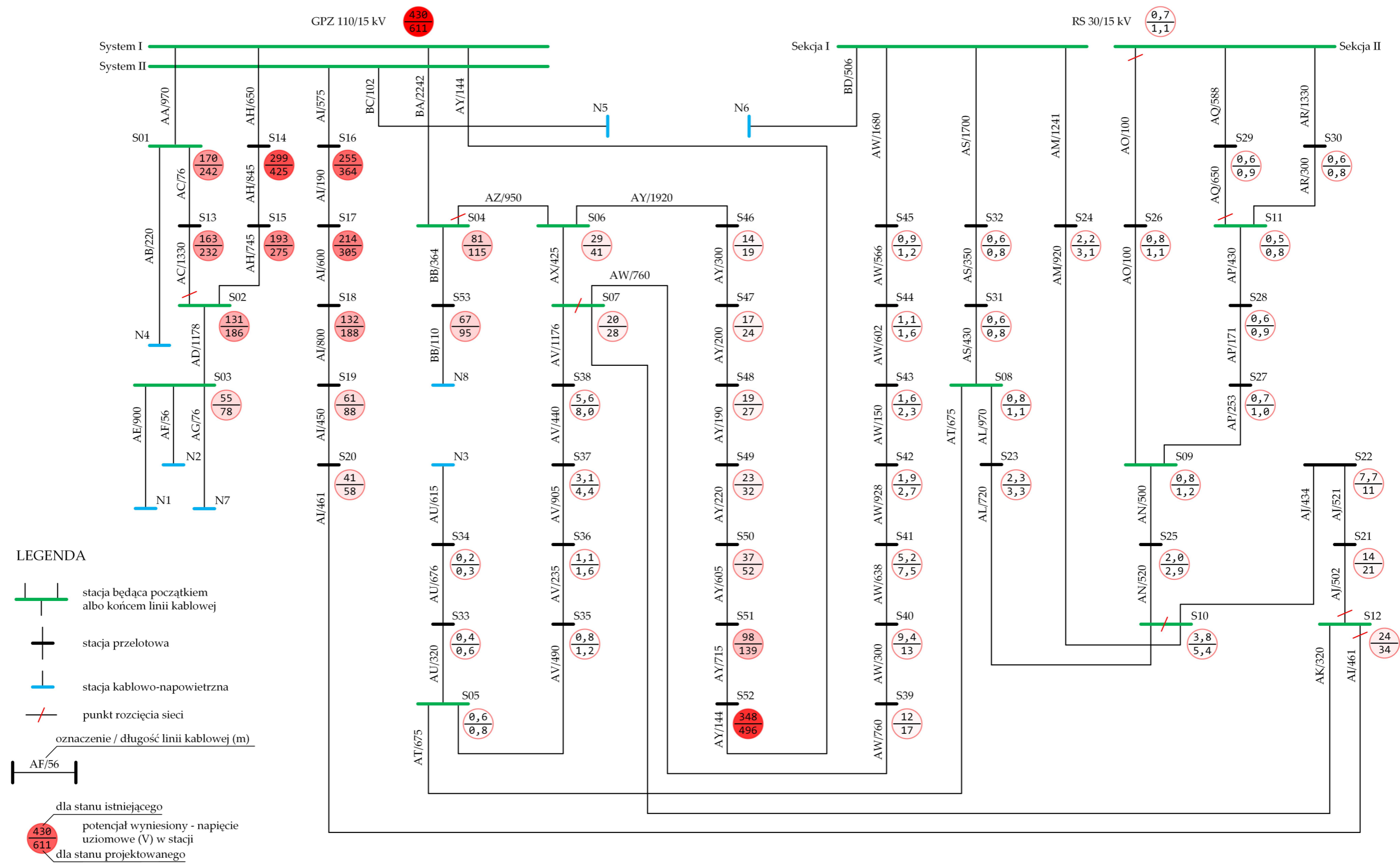
Tabela. 2.1. Porównanie wybranych wielkości zwarciovych wyznaczonych metodą symulacyjną oraz metodą normatywną

Parametr	Metoda symulacyjna			Metoda normatywna		
	SI	SD1	SD2	SI	SD1	SD2
I_F (A)	$9026 \cdot e^{-j75^\circ}$	$15087 \cdot e^{-j76^\circ}$	$14939 \cdot e^{-j76^\circ}$	$9373 e^{-j82^\circ}$	$15544 \cdot e^{-j84^\circ}$	$15535 \cdot e^{-j83^\circ}$
$3I_{0LAI}$ (A)	$4520 \cdot e^{j111^\circ}$	$4352 \cdot e^{j110^\circ}$	$4422 \cdot e^{j110^\circ}$	$4667 \cdot e^{-j82^\circ}$	$4495 \cdot e^{-j82^\circ}$	$4505 \cdot e^{-j83^\circ}$
$3I_{0LAII}$ (A)	$2435 \cdot e^{j108^\circ}$	$2346 \cdot e^{j107^\circ}$	$2383 \cdot e^{j106^\circ}$	$2372 \cdot e^{-j74^\circ}$	$2289 \cdot e^{-j74^\circ}$	$2294 \cdot e^{-j75^\circ}$
$3I_{0Kwn}$ (A)	–	$6401 \cdot e^{j103^\circ}$	$6119 \cdot e^{j106^\circ}$	–	$6543 \cdot e^{-j88^\circ}$	$6489 \cdot e^{-j84^\circ}$
$ U_E $ (V)	430	443	611	470	452	457

SI – stan istniejący

SD1 – stan docelowy dla $R_{EC} = 0,05 \Omega$

SD2 – stan docelowy dla $R_{EC} = 0,5 \Omega$



Rys. 2.10. Napięcia uziomowe w stacjach 15/0,4 kV wyniesione ze stacji

Wartości prądu zwarcia I_F otrzymane przy zastosowaniu metody normatywnej są około 4% większe. Natomiast wartości prądów $3I_{0LAI}$ oraz $3I_{0LAI}$ otrzymane metodą normatywną różnią się około $\pm 3\%$.

Można więc stwierdzić, że wyniki otrzymywane z metody normatywnej w zakresie obliczania prądu zwarcia i jego rozptywu są zadowalające. Niestety, stwierdzenie to nie jest prawdziwe dla wartości napięć uziomowych U_E . O ile w wariancie SI oraz SD1 wartości napięć uziomowych są większe odpowiednio o około 9% i 2% w stosunku do wartości pochodzących z metody symulacyjnej, to w wariancie SD2 wartość ta jest zaniżona aż o 25%. Można stwierdzić, że zastosowanie dla oceny zagrożenia porażeniowego zaawansowanych modeli i metod symulacji – takich jak przedstawione w niniejszej dysertacji – jest niezbędne.

3 Podsumowanie

Rozprawa stanowi istotny wkład w dziedzinie modelowania i analizy układów elektroenergetycznych w zakresie zwarciovych stanów zakłóceniovych i towarzyszących im zagrożeń porażeniowych. Zaproponowano w niej kompleksową metodę analizy skutków zwarcí doziemnych w aspekcie zagrożenia porażeniowego w stacjach elektroenergetycznych, której oryginalność polega na zastosowaniu zaawansowanych modeli polowych i obwodowych elementów tworzących układ uziomowy.

Zaproponowane w rozprawie modele zastosowano w badaniach i analizach skutków zwarcí doziemnych w rzeczywistych sieciach elektroenergetycznych wysokiego i średniego napięcia. Badania te przeprowadzono wielowariantowo i porównawczo, zarówno w odniesieniu do stanu istniejącego i docelowego sieci wysokiego napięcia, jak i w odniesieniu do metody proponowanej w dokumentach normalizacyjnych. Kompleksowość zaproponowanej metody umożliwia wyznaczenie napięć uziomowych i dotykowych nie tylko na terenie stacji, w której rozważa się zwarcie, ale dzięki zaawansowanym modelom linii elektroenergetycznych możliwe jest wyznaczenie napięć przeniesionych na inne uziomy i wyznaczenie prądów w przewodach odgromowych czy żyłach powrotnych kabli.

Zastosowanie dla oceny zagrożenia porażeniowego zaawansowanych modeli i metod symulacji – takich jak przedstawione w niniejszej dysertacji – jest niezbędne, a tym samym poprawna ocena bezpieczeństwa porażeniowego w stacjach elektroenergetycznych uwarunkowana jest zastosowaniem tych modeli i metod w wyznaczaniu rozptyłów prądów zwarciovych.

Publikacje

- [1] **Gajdzica J.**, Nowak W., Szpyra W., Tarko R.: *Analiza prądów płynących w uziemieniach stacji elektroenergetycznych w czasie zwarć jednofazowych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, ISSN 2353-1290, 2018 nr 60, str. 23–26
- [2] **Gajdzica J.**, Nowak W., Tarko R.: *Analiza narażeń przepięciowych powłok kabli w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć*, Przegląd Elektrotechniczny / Stowarzyszenie Elektryków Polskich ; ISSN 0033-2097, 2022, Vol. 98 nr 10, s. 140-143
- [3] **Gajdzica J.**, Nowak W., Szpyra W., Tarko R.: *Modelling and Analysis of Currents Flowing in High Voltage Power Substations During Ground Short - Circuits*, 2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Szczecin, Poland, 2018, pp. 1-4
- [4] Tarko R., **Gajdzica J.**, Nowak W.: *Oddziaływanie elektromagnetyczne linii przesyłowych 400 kV na środowisko - analiza i metody jego redukcji*, Śląskie Wiadomości Elektryczne: dwumiesięcznik naukowo-techniczny oddziałów SEP woj. śląskiego i opolskiego, ISSN 1506-5758, 2022, R. 24 nr 5, s. 11–16
- [5] Tarko R., **Gajdzica J.**, Nowak W.: *Oddziaływanie elektromagnetyczne linii przesyłowych 400 kV na środowisko - analiza i metody jego redukcji*, Nauka – technika – technologia: seria wydawnicza AGH, e-ISBN: 978-83-67427-15-9, 2022, T.6, s. 137–147
- [6] Tarko R., **Gajdzica J.**, Nowak W., Szpyra W.: *Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems*. Energies, Vol. 14, Issue 16, 2021
- [7] Tarko R., **Gajdzica J.**, Nowak W., Szpyra W.: *Study of the lightning overvoltage protection effectiveness of high voltage mixed overhead cable power lines*, Energies, Vol. 14, Issue 8, 2021