

doi:10.15199/48.2024.04.02

Analiza rozptyłu prądów w przewodach odgromowych wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć – część 1

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy związane z obliczaniem rozptyłu jednofazowych prądów zwarcia w przewodach odgromowych w liniach napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Szczególną uwagę zwrócono na napowietrzne linie wielotorowe, w tym wielonapięciowe, gdyż w liniach tych występują różnice zarówno w poziomach prądów zwarciovych, jak i wartościach prądów zwarcia w poszczególnych fazach tego samego toru. Analizie poddano sylwetki linii napowietrznych o zróżnicowanym poziomie niesymetrii geometrycznej, w tym uwzględniono również różne konfiguracje pracy badanych linii i ich otoczenia sieciowego.

Abstract. This article presents problems related to the calculation of the flow of single-phase short-circuit currents in lightning conductors in high-voltage overhead lines. Particular attention was paid to overhead multi-circuit lines, including multi-voltage lines because these lines differ both in the levels of short-circuit current levels and in the values of short-circuit currents in individual phases of the same circuit. The silhouettes of overhead lines with various levels of geometric asymmetry were analyzed, including various configurations of the operation of the tested lines and their network vicinity. (Analysis of the flow of currents in lightning conductors of the multi-circuit, multi-voltage high and highest voltage overhead lines – part 1)

Słowa kluczowe: napowietrzne linie wielotorowe, rozptył prądu zwarciovego, przewody odgromowe, dobór przewodów odgromowych.

Keywords: multi-circuit overhead lines, short-circuit current flow, lightning conductors, selection of ground wires.

Wprowadzenie

Na system elektroenergetyczny składają się system wytwórczy, złożony z różnego typu i wielkości jednostek generujących energię elektryczną, system przesyłowo-rozdzielczy, złożony z linii i stacji o różnych poziomach napięć i zdolnościach przesyłowych, oraz system odbiorców pobierających i konsumujących energię elektryczną. Na pewność działania tego systemu nakładana jest coraz większa presja zarówno od strony niezawodności dostaw energii (pewności zasilania odbiorców), jak i od strony środowiskowej (minimalizacja wpływu na środowisko naturalne). W systemie wytwórczym przejawia się to głównie na ograniczeniu wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii elektrycznej i tym samym zmniejszeniu różnego rodzaju emisji do atmosfery, zaś w systemie przesyłowym na dążeniu do intensyfikacji wykorzystania istniejącej infrastruktury oraz budowie nowych i efektywniejszych pod względem eksploatacji elementów sieci.

Jednym z głównych elementów systemu przesyłowego są linie napowietrzne najwyższych i wysokich napięć. W Polsce są to linie o napięciu znamionowym 400, 220 i 110 kV, które prowadzi się najczęściej w konfiguracji jednotorowej lub dwutorowej. Coraz częściej operatorzy systemu przesyłowego sięgają po rozwiązania w postaci linii wielotorowych, w tym wielonapięciowych (WWLN).

WWLN są to napowietrzne linie prądu przemiennego, w których na wspólnej konstrukcji wsporczej prowadzi się tory prądowe o różnych napięciach znamionowych. W Europie, oprócz Polski, takie rozwiązania są popularne w Danii, Holandii, Niemczech, Czechach, Austrii. Podstawową zaletą tego typu rozwiązania jest intensyfikacja wykorzystania terenu zajmowanego przez linie napowietrzne [1,2]. Ponadto WWLN nie wykazują zwiększonych poziomów natężenia pola elektromagnetycznego w swoim otoczeniu w porównaniu do tradycyjnych linii najwyższych napięć [1,2,3]. WWLN stanowią jednak duże wyzwanie na etapie projektowania i doboru poszczególnych elementów składowych takich linii. Różne odstępki izolacyjne dla poszczególnych torów powodują, że sylwetka słupa zwykle jest niesymetryczna.

Skutkuje to określonymi problemami w pracy takich linii i ich otoczenia sieciowego [3].

Przewody odgromowe stanowią obok konstrukcji wsporczych (słupów) i przewodów fazowych integralną część linii elektroenergetycznej. Podstawowym celem ich instalowania jest zapewnienie ochrony przewodów fazowych przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi. Jednak ich wpływ na linię nie ogranicza się jedynie do zapewnienia ochrony odgromowej. Przewody odgromowe uczestniczą także w przepływie prądów zwarciovych w czasie zwarcí doziemnych, mają wpływ na wartości prądów zwarciovych, jak również wpływają na system ochrony przeciwporażeniowej linii. To właśnie prąd przepływający przez przewody odgromowe w czasie trwania zwarcia stanowi podstawowe kryterium ich doboru. Właściwy dobór przewodów odgromowych ma znaczący wpływ na bezpieczeństwo pracy linii elektroenergetycznej, a tym samym na bezpieczeństwo pracy całego systemu elektroenergetycznego. Z uwagi na istotność zagadnienia, problematyka poruszana w niniejszym artykule dotyczy aspektów związanych z doбором przewodów odgromowych w liniach wielotorowych, wielonapięciowych.

Dobór przewodów odgromowych – przegląd metod

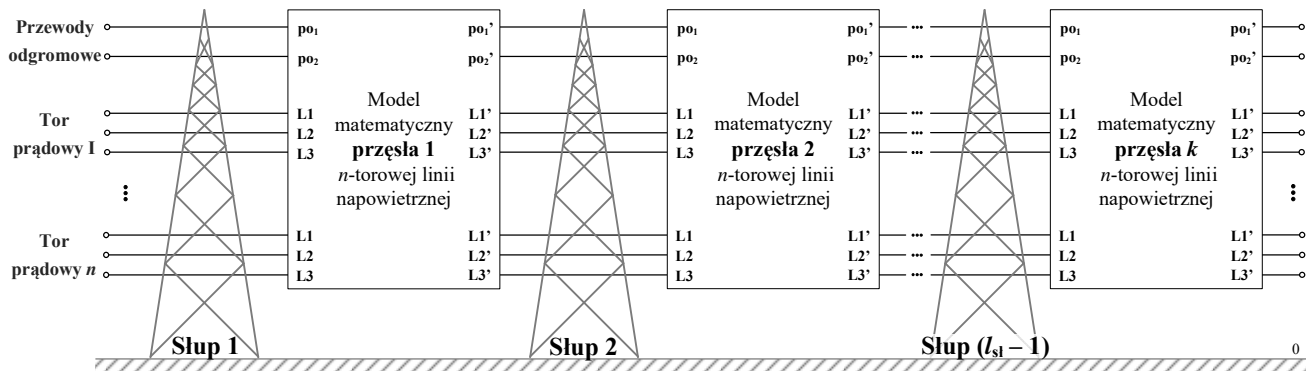
Podstawą doboru przewodów odgromowych jest wyznaczenie rozptyłu prądu zwarcia jednofazowego przy zwarciu na kolejnych słupach. Zagadnienie to jest dobrze opisane w literaturze, zarówno zagranicznej jak krajowej, przy czym w obliczeniach tych stosowane są różnego rodzaju uproszczenia. Przykładem metody stosowanej w kraju jest metoda wyznaczania prądów w przewodach odgromowych opisana w [4] i zastosowana w komercyjnym oprogramowaniu do doboru przewodów odgromowych [5]. Metoda bazuje na superpozycji prądów indukowanych w przewodzie odgromowym od prądów płynących przewodami fazowymi (składowej zerowej prądu zwarcia jednofazowego) oraz tzw. prądu galwanicznego stanowiącego pozostałą część prądu dopływającego do miejsca zwarcia (po odjęciu składowych indukowanych). Przewody odgromowe wraz z impedancjami słupów modelowane są przez układ drabinkowy, który jest składany

krok po kroku, aż do uzyskania pojedynczej zastępczej impedancji widzianej od miejsca zwarcia aż do uziemienia w stacji na jednym i drugim końcu linii. Inne podejście nieco bardziej uniwersalne, zastosowano w pracy [6], gdzie dokonano pełnego modelu linii wraz z przewodami odgromowymi i wyznaczono metodą rozptywową zarówno prąd zwarcia przy modelowanym zwarciu jednofazowym na wybranym słupie, jak i jego rozptył łącznie z przewodami odgromowymi. Ta metoda w układach niesymetrycznych jest prostsza do zastosowania dla badania zwarć różnych faz (przewodów) do słupa. W liniach wielotorowych jednonapięciowych (zwykle dwutorowych) wystarczy

wykonać obliczenia dla jednego toru, gdyż linie te są symetryczne z punktu widzenia każdego toru.

Inaczej ma się sprawa w przypadku WWLN, które są, ze względu na różne poziomy napięć torów, zdecydowanie bardziej zróżnicowane. W tym przypadku konieczne jest zbadanie wszystkich zwarć przewodów z konstrukcją słupa. Do tych analiz lepsza wydaje się być metoda rozptylowa [6].

Autorzy niniejszego artykułu zbudowali własny model do analiz rozptyłów prądów, który jest zbliżony do opisanego w [6].



Rys. 1. Składanie pełnego schematu linii z modeli poszczególnych przęseł

Model systemu do wyznaczania prądów w przewodach odgromowych

Podstawą modelu do wyznaczania prądów w przewodach odgromowych jest model matematyczny linii napowietrznej, który jest reprezentantem każdego pojedynczego przęsła linii. Sposób jego wyznaczenia dla parametrów wzdłużnych – impedancji własnych poszczególnych przewodów oraz impedancji wzajemnych pomiędzy nimi – oparty jest na teorii obwodów ziemnopowrotnych, zaś do wyznaczenia pojemności doziemnych oraz międzyprzewodowych stosowane są współczynniki Maxwella [3,7]. Ostateczną postacią tego modelu jest macierz admitancyjna linii Y_L , o wymiarze $2 \cdot (3 \cdot n + l_{po})$, gdzie n jest liczbą torów linii, a l_{po} liczbą przewodów odgromowych. W klasycznym przypadku modelowania linii dokonuje się agregacji przewodów odgromowych do parametrów przewodów fazowych, co zmniejsza rozmiar modelu, jednak w tym przypadku nie można jej wykonać, gdyż to przewody odgromowe i prądy w nich płynące są istotą obliczeń. Na rysunku 1 przedstawiono w sposób blokowy (wielowrotnika) badaną linię. Cała linia zbudowana jest z łańcuchowo połączonych bloków (wielowrotników), których parametry zróżnicowane są długościami poszczególnych przęseł. Wejście i wyjście danego wielowrotnika reprezentuje kolejny słup w linii. Słupy te zostają w modelu ponumerowane od 1 do l_{sl} .

Dla celów wyznaczenia rozptyłu prądów zwarciovych w poszczególnych przęsłach konieczne jest wprowadzenie wymuszenia prądowego w modelu. W tym celu model został uzupełniony o dwie grupy węzłów zasilających (po $3 \cdot n$ węzłów na każdym końcu linii), do których zostają przyłączone idealne źródła napięciowe oraz ekwiwalent sieci odpowiadający impedancji zgodnej i zerowej w danym węźle. Tworzony jest on oddzielnie dla każdego toru linii i przedstawiony za pomocą macierzy admitancyjnej Y_E . Danymi wejściowymi są moc zwarciova systemu w węźle przyłączenia toru S_{kQ} oraz stosunek $k = X_0/X_1$ – ze względu na poziom napięcia przyjmuje się zerowe wartości rezystancji. Sposób przyłączenia pojedynczego źródła

zastępczego pokazano na rysunku 2. Wszystkie ekwiwalenty torów, poszczególne macierze Y_E dla każdego toru i końca do którego jest przyłączona, tworzą jedną macierz admitancyjną Y_{zr} :

$$(1) \quad Y_{zr} = \begin{bmatrix} Y_E & -Y_E \\ -Y_E & Y_E \end{bmatrix}$$

gdzie:

$$(2) \quad Y_E = X_E^{-1}$$

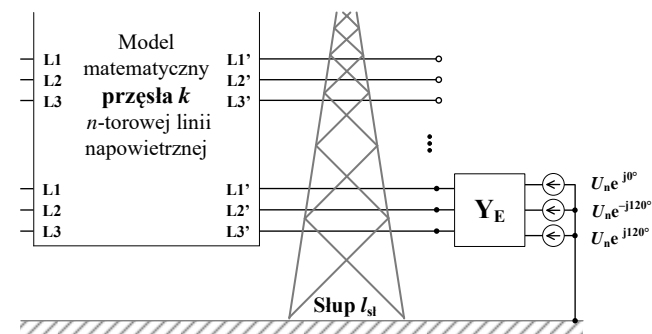
zaś

$$(3) \quad X_E = \begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix}$$

Poszczególne elementy macierzy X_E wyznaczone są według poniższych zależności:

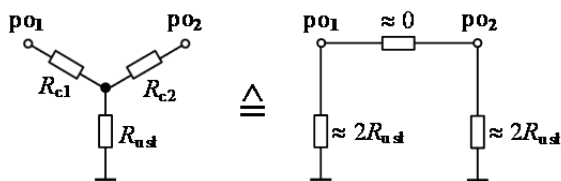
$$(4) \quad X_s = \frac{2X_1 + X_0}{3}, \quad X_m = \frac{X_0 - X_1}{3}$$

$$(5) \quad X_1 = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_{kQ}}, \quad X_0 = k \cdot X_1$$



Rys. 2. Sposób przyłączenia źródła zastępczego do końca jednego toru linii

Ostatnim elementem modelu są uziemienia słupów i stacji. W przypadku pojedynczego przewodu odgromowego zastosowano proste podejście w postaci pojedynczej rezystancji równej rezystancji uziemienia słupa, natomiast w przypadku dwóch przewodów odgromowych zastosowano model analogiczny do zastosowanego w [6], który przedstawiono na rysunku 3. Dla każdego słupa poza wartością rezystancji uziomu słupa $R_{u\text{sl}}$ wprowadza się dodatkowo dwie rezystancje R_{c1i} i R_{c2i} , które odpowiadają rezystancji przejścia pomiędzy przewodem odgromowym a konstrukcją słupa oraz uwzględniają rezystancję słupa pomiędzy wieżyczkami, na których zamocowane są przewody odgromowe. W obliczeniach gwiazda tych rezystorów zmienia się na trójkąt, by pozbyć się dodatkowego węzła. Dla standardowych obliczeń rezystancje R_{c1i} i R_{c2i} , są bardzo małe, co skutkuje, że w modelu trójkątnym impedancja pomiędzy przewodami odgromowymi jest bardzo mała, zaś obie rezystancje doziemne są dwukrotnie większe niż rzeczywista rezystancja uziemienia słupa.



Rys.3. Model słupa i jego uziemienia dla dwóch przewodów odgromowych w postaci gwiazdy (parametry rzeczywiste) oraz po przekształceniu do postaci trójkąta (model użyteczny)

Wszystkie elementy uziemień zgrupowano w macierzy admitancyjnej uziemień Y_{uz} .

Sumując macierze linii Y_L , ekwiwalentów Y_{zr} oraz uziemień Y_{uz} otrzymuje się pełną macierz modelu Y .

Uzupełniając tę macierz o model zwarcia - połączenie przez bardzo dużą admitancję węzła na wybranym słupie i fazie, która ma być zwarta z węzłami odpowiadającym miejscom przyłączenia przewodów odgromowych na tym słupie, otrzymuje się ostateczną macierz admitancyjną sieci Y .

Rozwiązując równanie (6):

$$(6) \quad \mathbf{I} = \mathbf{YU}$$

ze względu na wektor napięć U , przy wymuszeniach I , otrzymuje się:

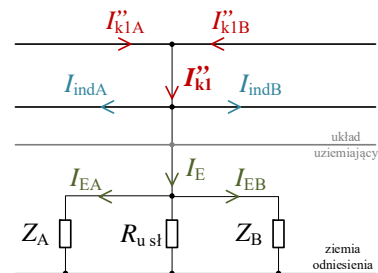
$$(7) \quad \mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{I}$$

Dysponując wektorem napięć węzłowych można wyznaczyć wszystkie prądy w układzie, w tym prądy w przewodach odgromowych.

Wpływ czynników geometrycznych na rozptył prądów w przewodach odgromowych

W [4] i [5] przedstawiono i zastosowano uproszczoną metodę wykorzystującą metodę superpozycji dwóch prądów w przewodzie odgromowym: prądu indukowanego oraz tzw. galwanicznego. Ideę tej metody wyjaśnia rysunek 4. Prąd indukowany wyliczany jest bezpośrednio z wykorzystaniem współczynnika redukcyjnego linii r definiowanego jako stosunek prądu ziemnopowrotnego (czyli płynącego w ziemi) do sumy prądów kolejności zerowej (w rozpatrywanym przypadku prądu zwarcia dopływającego do miejsca doziemienia). Wykorzystywana jest przybliżona wartość tego współczynnika nieuwzględniająca rezystancji uziemień słupów. W praktyce takie przybliżenie jest dopuszczalne. Prąd galwaniczny sumaryczny I_E jest różnicą prądu zwarciovego i sumy prądów indukowanych.

W cytowanych pracach [3] i [4] do obliczeń przyjmuje się fazę zwartą najbardziej odległą od przewodu odgromowego. Jednak nawet w przypadku stosowania tej metody nie zawsze maksymalny prąd w przewodzie odgromowym pojawia się w przypadku zwarcia na fazie najbardziej oddalonej od niego. Problem jest bardziej złożony i zależy między innymi od prądu zwarcia (udziału) jaki dopływa od stacji do miejsca zwarcia.



Rys. 4. Rozptył prądu składowej indukowanej i galwanicznej [4]

Wg oznaczeń jak na rysunku 4, prąd w przewodzie odgromowym w kierunku stacji A można wyznaczyć jako:

$$(8) \quad I_{poA} = I_{indA} + I_{EA}$$

gdzie

$$(9) \quad I_{indA} = I_{k1A}''(1-r), \quad I_{k1A}'' = k_z \cdot I_{k1}, \quad r = \frac{Z_{s\text{po}} - Z_{m\text{po-pf}}}{Z_{s\text{po}}}$$

$$(10) \quad I_{EA} = I_E \cdot p_A, \quad I_E = I_{k1}'' \cdot r, \quad p_A = \frac{R_{u\text{sl}} \parallel Z_B}{Z_A + R_{u\text{sl}} \parallel Z_B}$$

gdzie: $Z_{s\text{po}}$ – impedancja własna przewodu odgromowego, $Z_{m\text{po-pf}}$ – impedancja wzajemna między przewodem odgromowym i przewodem fazowym. Parametr k_z różnicuje prąd zwarcia dopływający od strony stacji A do słupa, na którym modeluje się zwarcie i zależy od mocy zwarciovych na obu końcach linii oraz od odległości miejsca zwarcia od początku linii. Współczynnik redukcyjny r oraz współczynnik p_A określający udział gałęzi A w rozptylu prądu galwanicznego I_E , zależą wyłącznie od parametrów linii i uziemień.

Dla sprawdzenia wpływu poszczególnych elementów na prąd w przewodzie odgromowym wykonano obliczenia dla linii jednotorowej 400 kV z przewodami zawieszonymi jak na rysunku 6b (bez torów 110 kV i tylko z lewym przewodem odgromowym – podobne sylwetki można spotkać przy prowadzeniu linii 400 kV przez tereny leśne – pionowe zawieszenie przewodów fazowych). Przyjęto zwarcie na czwartym słupie linii oraz długości pręseł i podejścia równe 400 m i 300 m. Zróżnicowano także prąd dopływający od strony stacji A, przy stałym sumarycznym prądzie zwarcia $I_{k1}'' = 20$ kA. Na podstawie wzoru (8) wyznaczono prąd w przewodzie odgromowym. Impedancję Z_A wyznaczono poprzez składanie schematu drabinkowego złożonego z rezystancji stacji R_{st} (przyjęto 0,1 Ω), impedancji własnej przewodu odgromowego $Z_{s\text{po}}$ oraz rezystancji słupa $R_{u\text{sl}}$ (przyjęto 10 Ω). Natomiast impedancję widzianą w kierunku stacji B Z_B wyznaczono ze wzoru (11) [4]:

$$(11) \quad Z_B = 0,5 \cdot \left[Z_{s\text{po}} + \sqrt{Z_{s\text{po}} \cdot (Z_{s\text{po}} + 4R_{u\text{sl}})} \right]$$

który można stosować dla układu drabinkowego składającego się z powyżej 10÷15 pręseł. Moduły prądów w przewodach odgromowych w stronę stacji A oraz B przedstawiono w tabeli 1. Parametrami obliczeń był

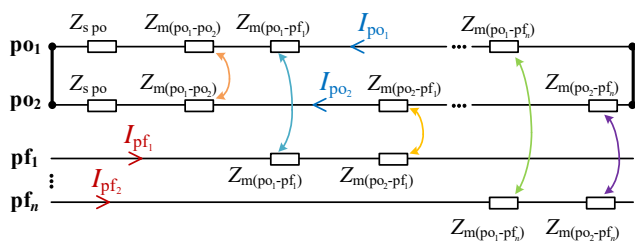
współczynnik k_z oraz wysokość zawieszenia przewodu fazowego objętego zwarcie nad ziemią h_{fz} . Przewód odgromowy zawieszony jest na wysokości 55 m i przesunięty o 2,6 m bliżej osi słupa niż przewody fazowe.

Tabela 1. Prądy w przęsłach przyległych do miejsca zwarcia dla linii jednotorowej, dla różnych wysokości zawieszenia przewodu fazowego objętego zwarcie h_{fz} i różnych długości przęseł a

$I_{po},$ kA	$k_z, -$	$a = 400$ m			$a = 300$ m		
		$h_{fz},$ m			$h_{fz},$ m		
		30	40,5	51	30	40,5	51
I_{poA}	0,5	13,10	12,92	12,53	13,46	13,26	12,86
I_{poB}		6,55	6,75	7,18	6,28	6,50	6,94
I_{poA}	0,7	14,10	14,06	13,95	14,47	14,41	14,29
I_{poB}		5,46	5,51	5,62	5,19	5,26	5,37
I_{poA}	0,75	14,36	14,35	14,32	14,73	14,70	14,65
I_{poB}		5,20	5,21	5,23	4,92	4,95	5,00
I_{poA}	0,8	14,62	14,63	14,67	14,99	15,00	15,01
I_{poB}		4,92	4,90	4,85	4,65	4,64	4,63
I_{poA}	0,9	15,13	15,22	15,41	15,50	15,58	15,75
I_{poB}		3,38	4,28	4,08	4,11	4,02	3,85

Z otrzymanych wyników wyraźnie wynika, że wybór przewodu objętego zwarcie ma wpływ na prąd w przewodach odgromowych, jednak nie jest on jednoznaczny. W przypadku dłuższych przęseł dla mniejszych udziałów prądów płynących od stacji A, większy prąd w przewodzie odgromowym płynie, gdy zwarcie występuje w bardziej oddalonym przewodzie fazowym (zawieszonym niżej). Przy $k_z = 0,75$ praktycznie nie ma znaczenia wybór fazy zwartej. Natomiast dla $k_z > 0,75$ większy prąd płynie w przewodzie odgromowym gdy zwarcie dosięga fazy bliższej temu przewodowi (zawieszonyj wyżej). Podobna sytuacja jest dla przęseł krótszych, jednak w tym przypadku dopiero powyżej $k_z = 0,8$ występuje analogiczna zależność. Z przeprowadzonej analizy wynika wniosek, że nie można zawsze wybierać fazy najbardziej oddalonej od przewodu odgromowego do wyznaczania prądu płynącego przez ten przewód.

Ponadto w przypadku dwóch przewodów odgromowych uziemionych na wszystkich słupach, istotnym jest również w jaki sposób cały prąd płynący w przewodach odgromowych w określonym kierunku, rozplywa się pomiędzy poszczególne przewody. Prądy te różnią się między sobą, co wyjaśnia rysunek 5 oraz wyprowadzona zależność (14).



Rys. 5. Wyznaczenie różnicy prądów w przewodach odgromowych

Rozpatrując jedno, dowolne przęsło analizowanego układu przedstawione na rysunku 5 można zapisać równanie zwartego na końcach jednego przęsła, tj. oczka utworzonego przez dwa przewody odgromowe.

$$\begin{aligned}
 & Z_{s\ po} \cdot I_{po1} + Z_{m(po1-po2)} \cdot I_{po2} - \sum_{i=1}^{3n} Z_{m(po1-pf_i)} \cdot I_{pf_i} = \\
 (12) \quad & = Z_{s\ po} \cdot I_{po2} + Z_{m(po1-po2)} \cdot I_{po1} - \sum_{i=1}^{3n} Z_{m(po2-pf_i)} \cdot I_{pf_i}
 \end{aligned}$$

gdzie: $Z_{m(po1-po2)}$ jest impedancją wzajemną między przewodami odgromowymi, I_{po1} oraz I_{po2} są prądami

zespolonymi w przewodach odgromowych, $Z_{m(po1-pf_i)}$ oraz $Z_{m(po2-pf_i)}$ i są impedancjami wzajemnymi pomiędzy odpowiednio przewodem odgromowym po_1 i po_2 a i -tym przewodem fazowym ($i = 1 \dots 3n$, gdzie n jest liczbą torów), I_{pf_i} jest prądem zespolonym w kolejnym przewodzie fazowym.

Po uporządkowaniu równania (12) otrzymuje się:

$$(13) \quad I_{po1} - I_{po2} = \frac{\sum_{i=1}^{3n} I_{pf_i} (Z_{m(po1-pf_i)} - Z_{m(po2-pf_i)})}{Z_{s\ po} - Z_{m(po1-po2)}}$$

Wykorzystując dodatkowo zależności na impedancje własne i wzajemne obwodów ziemnopowrotnych [3], wzór (13) można podać w następującej postaci:

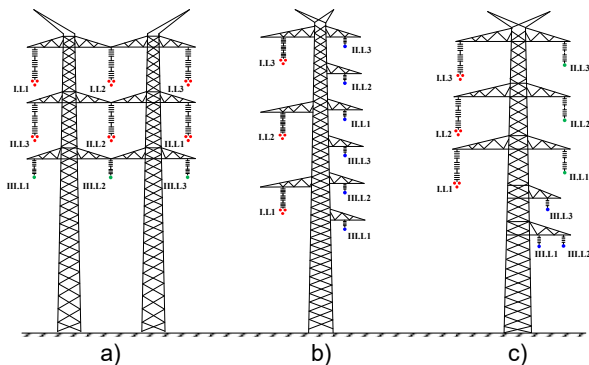
$$\begin{aligned}
 (14) \quad I_{po1} - I_{po2} &= \frac{\sum_{i=1}^{3n} j0,145 \cdot I_{pf_i} \left(\lg \frac{\delta}{D_{po1-pf_i}} - \lg \frac{\delta}{D_{po2-pf_i}} \right)}{R'_{s\ po} + j0,145 \cdot \left(\lg \frac{\delta}{GMR_{po}} - \lg \frac{\delta}{D_{po1-po2}} \right)} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^{3n} j0,145 \cdot I_{pf_i} \lg \frac{D_{po2-pf_i}}{D_{po1-pf_i}}}{R'_{s\ po} + j0,145 \cdot \lg \frac{D_{po1-po2}}{GMR_{s\ po}}}
 \end{aligned}$$

Analiza zależności (14) pokazuje jednoznacznie, że różnica geometryczna prądów w przewodach odgromowych pierwszym i drugim jest stała i zależy głównie od wartości prądów zwarcia, a te w liniach o różnych poziomach napięć mogą być i zwykle są różne. Ponadto różnica ta zależy również od stosunku odległości pomiędzy danym przewodem fazowym, w którym płynie prąd zwarcia, a przewodami odgromowymi. W przypadku, gdy prądy zwarcia jednofazowego we wszystkich fazach są jednakowe, różnica geometryczna prądów jest największa, gdy stosunek odległości przewód fazowy – przewody odgromowe jest największy. Jest tak, gdy jeden z przewodów fazowych najbardziej zbliża się do przewodu odgromowego. W przypadku pionowego zawieszenia przewodów jest tak dla przewodu położonego najwyżej na słupie. Natomiast w przypadku zawieszenia poziomego, stosunek ten będzie największy dla skrajnego przewodu znajdującego się bliżej przewodu odgromowego. Oczywiście stałość różnicy zespolonych prądów w przewodach odgromowych nie oznacza stałości różnicy modułów tych prądów. Pokazano to w pracy [5], gdzie przedstawiono jak zmienia się kąt fazowy prądu w przewodzie odgromowym. Dla dużej liczby przęseł może ona przekraczać 180° względem prądu w pierwszym, sąsiadującym z miejscem zwarcia przęsłem. Efekt ten powoduje nawet zmianę kierunku przepływu prądu w słupach od ziemi do przewodu odgromowego.

Analiza wybranych przypadków dla różnych sylwetek linii trójtorowych

Do analizy rozplywu prądów w przewodach odgromowych wybrano trzy różne linie trójtorowe przedstawione na rysunku 6. Są to kolejno: a) – linia dwunapięciowa $2 \times 400 + 220$ kV (rzeczywista linia przy stacji Łagisza), b) – linia dwunapięciowa $400 + 2 \times 110$ kV (okolice Wrocławia) oraz c) – linia trójnapięciowa $400 + 220 + 110$ kV (geometria wyznaczona na podstawie linii czterotorowej Plewiska-Wrocław). W każdym przypadku przyjęto, że linie mają długość 80 km i składają się z 199 przęseł po 400 m każde. Przyjęto również, że moce zwarcia dla poszczególnych poziomów napięć są

zawsze takie same i jednakowe na obu końcach toru o danym napięciu.

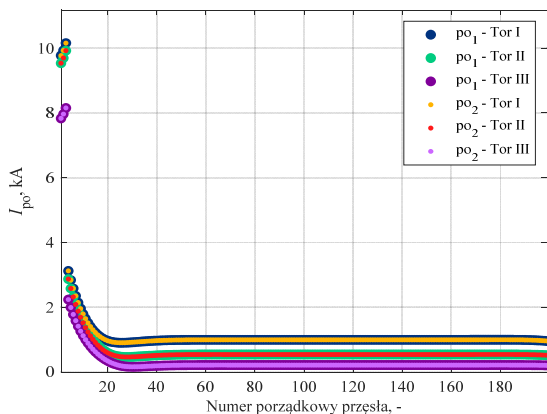


Rys.6. Analizowane sylwetki słupów linii trójtorowych [3]

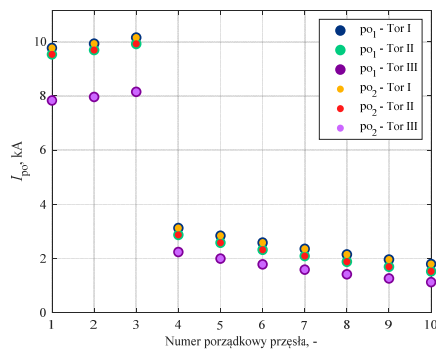
Podstawowym wynikiem otrzymanym jest rozkład prądów w poszczególnych przewodach odgromowych w zależności od miejsca zwarcia (tj. na którym słupie) oraz od przewodu fazowego, który został zwarty do słupa. Istotnym jest, że prąd ten zależy silnie od odległości (bliskości) miejsca zwarcia oraz że w dwóch przewodach odgromowych prąd ten jest różny. Pokazano to na rysunkach 7÷10 dla poszczególnych rodzajów linii przy założeniu, że zwarcie występuje na czwartym słupie linii. Wyniki pokazano dla trzech zwarcz, po jednym na każdym torze. Na rysunku 7 dla linii a), przedstawiono wyniki dla wszystkich 199 przęseł, natomiast na rysunkach 8÷10 dla wszystkich rozważanych linii, ograniczono się do przedstawienia pierwszych 10 przęseł najbliższych miejscu zwarcia. Dla dalszych przęseł tych linii trend jest analogiczny jak na rysunku 7.

Dla doboru przewodów odgromowych analizę rozptyłu prądów należy wykonać dla zwarcz na każdym ze słupów i sprawdzić prądy płynące w przewodach odgromowych w każdym przęśle. Ponieważ największe wartości występują zawsze w dwóch przęstach przylegających do miejsca zwarcia, w praktycznych obliczeniach wyznacza się tylko te prądy (w kierunku stacji A oraz B). Po wykonaniu wszystkich obliczeń wyznacza się maksymalne wartości, które wystąpiły w danym przęśle i na podstawie tych prądów dokonuje się doboru przekroju przewodu odgromowego ze względu na wartość prądu zwarciovego cieplnego.

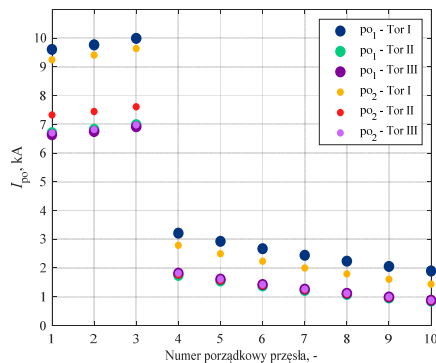
W tabelach 2÷4 zestawiono wyniki obliczeń prądów w przewodach odgromowych, gdy zwarcie wystąpiło na słupie 4 (blisko stacji zasilającej A) oraz na słupie 65 (w jednej trzeciej długości linii).



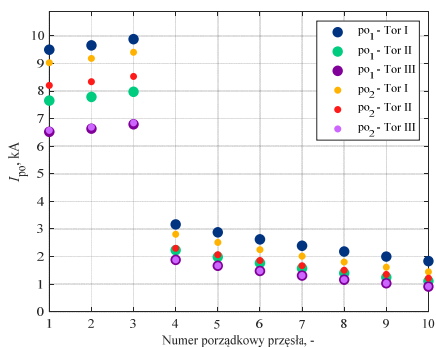
Rys.7. Największe prądy płynące w przewodach odgromowych po_1 i po_2 przy zwarcu na 4 słupie linii a) dla wszystkich przęseł



Rys.8. Największe prądy płynące w przewodach odgromowych po_1 i po_2 przy zwarcu na 4 słupie linii a) dla pierwszych 10 przęseł



Rys.9. Największe prądy płynące w przewodach odgromowych po_1 i po_2 przy zwarcu na 4 słupie linii b) dla pierwszych 10 przęseł



Rys.10. Największe prądy płynące w przewodach odgromowych po_1 i po_2 przy zwarcu na 4 słupie linii c) dla pierwszych 10 przęseł

Tabela 2. Prądy w przęstach przyległych do miejsca zwarcia dla linii a)

Miejsce zwarcia	Słup 4		Słup 65	
	po_1	po_2	po_1	po_2
T1-L1	10,16	8,98	5,23	4,56
	3,12	2,70	3,91	3,47
T1-L2	9,67	9,67	4,92	4,92
	2,87	2,87	3,68	3,68
T1-L3	8,98	10,16	4,56	5,23
	2,70	3,12	3,47	3,91
T2-L1	9,39	9,92	4,57	4,86
	2,72	2,87	3,49	3,67
T2-L2	9,78	9,78	4,75	4,75
	2,76	2,76	3,57	3,57
T2-L3	9,92	9,39	4,86	4,57
	2,87	2,72	3,67	3,49
T3-L1	8,15	7,89	2,65	2,56
	2,24	2,20	2,00	1,95
T3-L2	8,07	8,07	2,61	2,61
	2,20	2,20	1,98	1,98
T3-L3	7,89	8,15	2,56	2,65
	2,20	2,24	1,95	2,00

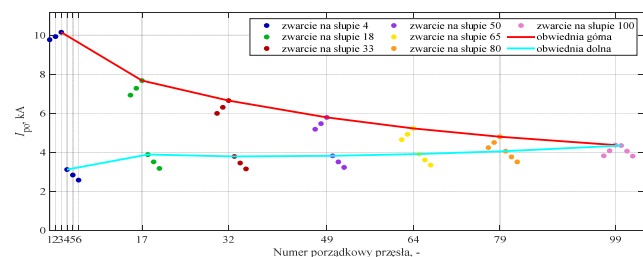
Tabela 3. Prądy w przesłach przyległych do miejsca zwarcia dla linii b)

Miejsce zwarcia	Słup 4		Słup 65	
	po ₁	po ₂	po ₁	po ₂
T1-L1	9,58	9,54	4,61	4,58
	2,83	2,80	3,55	3,54
T1-L2	9,76	9,63	4,84	4,76
	2,84	2,79	3,64	3,59
T1-L3	9,99	9,21	5,42	4,95
	3,21	2,88	4,03	3,71
T2-L1	6,96	7,08	1,50	1,53
	1,79	1,79	1,10	1,11
T2-L2	6,99	7,24	1,55	1,60
	1,75	1,76	1,11	1,13
T2-L3	6,87	7,44	1,59	1,76
	1,70	1,75	1,11	1,20
T3-L1	6,80	6,83	1,41	1,42
	1,88	1,88	1,08	1,08
T3-L2	6,86	6,90	1,44	1,44
	1,85	1,85	1,08	1,08
T3-L3	6,91	6,98	1,47	1,48
	1,82	1,82	1,09	1,09

Tabela 4. Prądy w przesłach przyległych do miejsca zwarcia dla linii c)

Miejsce zwarcia	Słup 4		Słup 65	
	po ₁	po ₂	po ₁	po ₂
T1-L1	9,57	9,40	4,62	4,53
	2,86	2,81	3,57	3,52
T1-L2	9,71	9,34	4,80	4,60
	2,92	2,81	3,66	3,54
T1-L3	9,88	9,01	5,16	4,66
	3,16	2,84	3,91	3,57
T2-L1	7,97	8,10	2,58	2,63
	2,23	2,25	1,97	2,00
T2-L2	7,95	8,22	2,65	2,74
	2,20	2,24	1,98	2,04
T2-L3	7,73	8,52	2,70	2,98
	2,16	2,30	1,99	2,15
T3-L1	6,75	6,82	1,38	1,40
	1,89	1,90	1,07	1,08
T3-L2	6,78	6,81	1,39	1,39
	1,89	1,89	1,07	1,07
T3-L3	6,79	6,84	1,40	1,41
	1,88	1,88	1,07	1,07

Na rysunku 11 przedstawiono rozkłady prądów w przewodach odgromowych przy zwarciach na kilku wybranych słupach linii a) licząc od strony lewej (stacji A) do połowy linii. Ograniczono się do przedstawienia wyników dla sześciu najbliższych przesł od rozważanego zwarcia. Ponieważ linia jest symetrycznie zasilana, z uwagi na zastosowanie takich samych mocy zwarciovych na obu jej końcach, wyniki są identyczne dla miejsc jednakowo oddalonych od końców linii. Zatem druga część wykresu (w kierunku stacji B) byłaby lustrzanym odbiciem rysunku 11.



Rys.11. Wybrane największe prądy płynące przewodami odgromowymi do miejsca zwarcia dla siedmiu różnych lokalizacji zwarcia

Górna obwiednia wykresów dla zważeń na poszczególnych słupach jest podstawą do doboru przekroju przewodów odgromowych z warunku prądu zastępczego cieplnego. Ponieważ maksymalne prądy płynące przez przewody odgromowe nie są takie same dla wszystkich przesł (większe prądy występują na w przesłach bliżej końców linii – szczególnie tego końca, gdzie moc zwarciovą jest większa) to w praktyce stosuje się stopniowanie przekroju przewodów odgromowych.

Podsumowanie

Wyniki przedstawione w artykule wskazują, że prądy w przewodach odgromowych zależą od wielu czynników, i nie zawsze stosowane do tej pory modele ich obliczenia są słuszne. Wykazano, że przyjmowany powszechnie pogląd o występowaniu maksymalnych prądów w przewodzie odgromowym przy wystąpieniu zwarcia jednofazowego w przewodzie najbardziej oddalonym od przewodu odgromowego, nie zawsze jest słuszny. Pokazano również różnicowanie prądu w przypadku występowania dwóch przewodów odgromowych, co silnie wpływa na ich dobór.

Dodatkowym czynnikiem różnicującym przepływy w przewodach odgromowych w przypadku linii wielotorowych, wielonapięciowych jest fakt, że prądy zważeń jednofazowych nie są identyczne w obrębie tego samego toru. Przedstawiony model wyznaczania prądów w przewodach odgromowych jest modelem dokładniejszym. Niepewność jego wyników zależy wyłącznie od niedokładności parametrów geometrycznych linii oraz parametrów elektrycznych tj. rezystancji uziemień słupów czy stacji oraz nie zawiera dodatkowych założeń typu: niezależność współczynnika redukcyjnego od miejsca zwarcia. Zaprezentowany model pozwala przeprowadzić szeroki zakres badań rozplywów prądów w przewodach odgromowych dla różnych rodzajów linii napowietrznych. Jest więc modelem uniwersalnym do prowadzenia takich badań.

Zaprezentowane wyniki są efektem fragmentu analiz wykonanych dla wybranych sylwetek wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych. Już te analizy wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań w tym kierunku. W drugiej części niniejszego artykułu przedstawiono wyniki szerszego spektrum analiz.

Autorzy: dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ, E-mail: Henryk.Kocot@polsl.pl, dr inż. Agnieszka Dziendziel, E-mail: Agnieszka.Dziendziel@polsl.pl, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

LITERATURA

- [1] Dziendziel A., Kocot H.: Korzyści i wyzwania związane z rozwojem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych WN i NN. Przegląd Elektrotechniczny 03/2022.
- [2] Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines. Energies 2021, 14, 421.
- [3] Dziendziel A.: Wielotorowe, wielonapięciowe elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokich i najwyższych napięć. Rozprawa doktorska 2022.
- [4] Żmuda K.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze. Wybrane zagadnienia z przykładami. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2014.
- [5] Podrecznik użytkownika MeLiNet 2.1, IPC Sp. z o.o.; <https://www.ipcsc.pl/index.php/oprogramowanie/pobieranie/file/24-melinet> [dostęp: 31.08.2023], Gliwice, 2016.
- [6] Klucznik J. Obliczanie wartości prądów w przewodach odgromowych linii napowietrznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, seria Monografie nr 162, Gdańsk 2017.
- [7] Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne. Warszawa: WNT 1979.