



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



JACEK KLUCZNIK

OBLICZANIE WARTOŚCI PRĄDÓW W PRZEWODACH ODGROMOWYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

GDAŃSK 2017

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Zbigniew Krzemiński

RECENZENCI

Zbigniew Lubośny

Marian Sobierajski

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem

www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog

zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.gda.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,
Gdańsk 2017

ISBN 978-83-7348-701-7

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. MODELE MATEMATYCZNE NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH WN	9
2.1. Wstęp	9
2.2. Równania Carsona dla linii elektroenergetycznych	10
2.3. Współczynniki Maxwella dla linii elektroenergetycznych	14
2.4. Wpływ zwisu i zmiennego układu przewodów na parametry linii	14
2.5. Model jednorodnej linii elektroenergetycznej z przewodem odgromowym ...	22
2.6. Model jednorodnej linii elektroenergetycznej z dwoma przewodami odgromowymi	24
2.7. Model dwutorowej linii elektroenergetycznej z dwoma przewodami odgromowymi	27
3. OBLICZANIE ROZPŁYWU PRĄDÓW W PRZEWODACH ODGROMOWYCH	32
3.1. Cel i metody obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych	32
3.2. Schematy zastępcze dla obliczeń rozptywu prądów zwarciovych	35
3.3. Nowa metoda obliczania rozptywu prądów w przewodach odgromowych	45
3.4. Analiza rozptywu prądów w linii jednorodnej z pojedynczym przewodem odgromowym	52
3.5. Analiza rozptywu prądów w linii jednorodnej z podwójnym przewodem odgromowym	59
3.6. Analiza rozptywu prądów w linii dwutorowej z podwójnym przewodem odgromowym	62
3.7. Analiza rozptywu prądów w rozbudowanych układach	65
4. DOKŁADNOŚĆ OBLICZANIA ROZPŁYWU PRĄDÓW METODĄ TABLEAU	76
4.1. Wstęp	76
4.2. Wykorzystanie modelu jednofazowego	76
4.3. Wykorzystanie programu PowerFactory	78
4.4. Ocena dokładności metody	82
4.5. Uwzględnienie susceptancji i konduktancji linii	87
5. DOBÓR PRZEWODÓW ODGROMOWYCH	90
5.1. Wytrzymałość cieplna przewodów	90
5.2. Ochrona przeciwporażeniowa	94

6. USZKODZENIA CIĄGŁOŚCI W SYSTEMIE OCHRONY ODGROMOWEJ	97
6.1. Wstęp	97
6.2. Rozpływ prądów zwarciovych przy uszkodzeniach	97
6.3. Ochrona przeciwporażeniowa przy uszkodzeniach	99
6.4. Skuteczność działania zabezpieczeń	100
7. PODSUMOWANIE	117
BIBLIOGRAFIA	119
Streszczenie w języku polskim	123
Streszczenie w języku angielskim	125

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

a	– operator obrotu
A, B, C	– oznaczenia faz
\mathbf{A}_1	– macierz incydencji
\mathbf{B}	– macierz susceptancji
E, E_1, E_2	– oznaczenia przewodów odgromowych
D_{ij}	– odległość przewodu i od przewodu j
f	– zwis przewodu
h	– wysokość przewodu nad powierzchnią ziemi
H	– naprężenie przewodu w najniższym punkcie przewodu
I_{thr}	– dopuszczalny prąd cieplny (krótkotrwały) przewodu odgromowego
\mathbf{I}	– wektor prądów
I_{Ei}	– prąd w przewodzie odgromowym w i -tym przęśle
I_{ti}	– prąd uziomowy i -tego słupa
j_{thn}	– dopuszczalna n -sekundowa gęstość prądu przy zwarciu
k_1	– przekładnia przekładników prądowych
k_k	– współczynnik kompensacji prądowej
K	– współczynnik Maxwella
\mathbf{K}_U	– macierz współczynników napięciowych
L	– długość przęsła
P, Q	– funkcje całkowe równań Carsona
r	– współczynnik redukcyjny
r_i	– promień przewodu
r_{ei}	– promień zastępczy przewodu
r_{zi}	– promień zastępczy przewodów wiązkowych
R_{int}	– rezystancja wewnętrzna przewodu
R_1	– rezystancja zastępcza dla składowej zgodnej
R_2	– rezystancja zastępcza dla składowej przeciwnej
R_0	– rezystancja zastępcza dla składowej zerowej
R_c	– rezystancja połączenia przewodu odgromowego i słupa
R_l	– rezystancja łuku
R_{ti}	– rezystancja uziemienia i -tego słupa
R_u	– rezystancja uziemienia stacji
s	– przekrój obliczeniowy przewodu
S_{ii}	– odległość przewodu i od swojego lustrzanego odbicia względem ziemi
S_{ij}	– odległość przewodu i od lustrzanego odbicia przewodu j względem ziemi
S''_K	– moc zwarciowa
t_k	– czas trwania zwarcia

U	– wektor napięć
U_t	– napięcie uziomowe
U_D	– dopuszczalne napięcie dotykowe
w	– ciężar własny przewodu
X_1	– reaktancja zastępcza dla składowej zgodnej
X_2	– reaktancja zastępcza dla składowej przeciwnej
X_0	– reaktancja zastępcza dla składowej zerowej
X_{int}	– reaktancja wewnętrzna przewodu
Y	– macierz admitancji
Z_{ij}	– impedancja wzajemna przewodów
Z_{ii}	– impedancja własna przewodu
Z	– macierz impedancji
σ	– rezystywność elektryczna gruntu
γ	– przewodność właściwa przewodu
μ_0	– przenikalność magnetyczna próżni
ε_0	– przenikalność elektryczna próżni
ω	– pulsacja

Rozdział 1

WSTĘP

Linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia należą do najważniejszych elementów współczesnych systemów elektroenergetycznych. Linie stanowią kręgosłup systemu elektroenergetycznego, spajając jego strukturę, łącząc węzły wytwórcze i węzły odbiorcze. Pozwalają na przesyłanie energii elektrycznej wytworzonej w elektrowniach do odbiorców znajdujących się często w dużej odległości od źródeł energii. Linie elektroenergetyczne łączą także systemy elektroenergetyczne różnych krajów, podnosząc ich niezawodność pracy oraz umożliwiając obrót energią elektryczną.

O tym, jak istotne jest zapewnienie bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego i zagwarantowanie nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej do odbiorców, świadczą wielkie awarie systemowe, jakie miały miejsce w przeszłości. Zdarzenia takie, określane mianem blackoutów, bardzo często powodowane są zakłóceniami i awariami w pracy linii elektroenergetycznych. Można tu wspomnieć awarię, jaka objęła swoim zasięgiem część wschodniego wybrzeża USA i Kanady w roku 2003, dotykając bezpośrednio około 55 mln osób. Również w roku 2003 doszło w Europie do pozbawienia zasilania na znacznym obszarze Włoch. Kolejna awaria w systemie europejskim, jaka wystąpiła w roku 2006, doprowadziła do podzielenia systemu na trzy pracujące asynchronicznie podsystemy i pozbawienia na kilka godzin zasilania części odbiorców w zachodniej części kontynentu. W Polsce w roku 2008 miała miejsce awaria obejmująca część województwa zachodniopomorskiego, w tym miasto Szczecin. Zasilania zostało pozbawionych około 630 tys. mieszkańców tego terenu.

Przyczyną wszystkich powyższych awarii były uszkodzenia i wyłączenia linii elektroenergetycznych, co spowodowało chaos wśród mieszkańców i znaczne straty finansowe. Skala obserwowanych strat i rozmiary obszaru objętego awariami systemowymi uświadomiamy, jak ważne dla bezpieczeństwa energetycznego kraju czy regionu są linie elektroenergetyczne, ich prawidłowe projektowanie, wybudowanie i eksploatacja.

Problematyka prezentowana w niniejszej monografii dotyczy jednego z aspektów projektowania, eksploatacji i modernizacji linii elektroenergetycznych, jakim jest dobór przewodów odgromowych. Przewody odgromowe stanowią obok konstrukcji wsporczych (słupów) i przewodów fazowych ważną 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 zwarc doziemnych, mają wpływ na wartości prądów zwarciovych, jak również wpływają na system ochrony przeciwporażeniowej linii. Przewody odgromowe we współczesnych liniach elektroenergetycznych zawierają często w swoim rdzeniu włókna światłowodowe wykorzystywane do komunikacji i sterowania. Wszystkie powyższe czynniki powodują, że właściwy dobór przewodów odgromowych ma znaczący wpływ na bez-

pieczeństwo pracy linii elektroenergetycznej, a tym samym na bezpieczeństwo pracy całego systemu elektroenergetycznego.

W monografii zaproponowano nową metodę obliczania wartości prądów płynących w przewodach odgromowych w czasie zwarć, pozwalającą na dobór przewodów odgromowych pod względem wytrzymałości cieplnej. Proponowana metoda charakteryzuje się większą dokładnością i większą uniwersalnością niż powszechnie stosowane techniki, pozwalając tym samym na dobór przewodów odgromowych z mniejszym ryzykiem niepewności.

Opisana w pracy metoda obliczeniowa umożliwia również ocenę ochrony przeciwporażeniowej linii poprzez wyznaczenie wartości prądów płynących w uziomach słupów oraz potencjałów słupów w czasie zwarć doziemnych.