

Spis treści

Wstęp	13
ROZDZIAŁ 1	
Postęp w elektroenergetyce jako efekt rozwoju wysokonapięciowych układów izolacyjnych	17
1.1. Rozwój światowej elektroenergetyki	17
1.2. Elektroenergetyczne napowietrzne linie przesyłowe	20
1.2.1. Linie napowietrzne napięcia przemiennego HVAC	20
1.2.2. Linie napowietrzne napięcia stałego HVDC	22
1.3. Elektroenergetyczne linie kablowe HVDC	24
1.4. Podstawy doboru wysokonapięciowych układów izolacyjnych	26
1.4.1. Materiały w wysokonapięciowych układach izolacyjnych	26
1.4.2. Trwałość układów izolacyjnych w warunkach narażeń eksploatacyjnych	28
1.4.3. Charakterystyki wytrzymałości elektrycznej podstawowych grup układów izolacyjnych	30
1.5. Rozwój technologii wysokonapięciowych układów izolacyjnych	32
ROZDZIAŁ 2	
Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia	37
2.1. Wprowadzenie	37
2.2. Zjawiska elektryczne w gazach elektroizolacyjnych	38
2.2.1. Konduktywność elektryczna	38
2.2.2. Rodzaje jonizacji w gazach	38
2.3. Wytrzymałość elektryczna gazów elektroizolacyjnych	43
2.4. Mechanizmy wyładowań elektrycznych w gazowych układach izolacyjnych	46
2.4.1. Charakterystyka prądowo-napięciowa powietrznego układu izolacyjnego	47
2.4.2. Teoria lawin elektronowych w gazach	51
2.4.3. Mechanizm strimerowy	56
2.4.4. Mechanizm liderowy	59

2.5. Wpływ ciśnienia na wytrzymałość elektryczną gazów	59
2.5.1. Charakterystyka Paschena	60
2.5.1.1. Współrzędne minimum charakterystyki Paschena	63
2.5.1.2. Wpływ temperatury na napięcie przeskoku	65
2.5.1.3. Wpływ pola magnetycznego na mechanizm wyładowań w gazie	66
2.6. Wytrzymałość elektryczna próżni	66
2.6.1. Układy izolacyjne próżniowe	66
2.6.2. Prawdopodobieństwo jonizacji zderzeniowej w gazach rozrzedzonych	67
2.6.3. Warunki inicjowania wyładowań w próżniowych układach izolacyjnych	68
2.6.4. Wyładowania zupełne w próżni	71
2.7. Wyładowania w gazach elektroujemnych	71
2.7.1. Elektroujemność pierwiastków chemicznych	72
2.7.2. Inicjowanie i rozwój wyładowania	72
2.8. Formy wyładowań elektrycznych w powietrzu	75
2.8.1. Podstawowy podział form wyładowań elektrycznych	75
2.8.2. Wyładowania w powietrzu w polu elektrycznym jednostajnym i niejednostajnym	76
2.8.3. Formy wyładowań elektrycznych w powietrzu w polu niejednostajnym	77
2.9. Wyładowania elektryczne na powierzchniach granicznych: dielektryk stały – dielektryk gazowy	78
2.9.1. Podstawowy podział form wyładowań na powierzchniach granicznych	79
2.9.2. Wyładowania na powierzchniach granicznych w polu elektrycznym jednostajnym i niejednostajnym	79
2.10. Wyładowania ślizgowe	81
2.10.1. Mechanizm inicjowania wyładowań ślizgowych	82
2.10.2. Etapy rozwoju wyładowań ślizgowych	85
2.10.3. Wpływ rezystywności powierzchniowej dielektryka stałego na napięcie początkowe wyładowań ślizgowych	90
2.10.4. Wzory doświadczalne na napięcie początkowe wyładowań ślizgowych	92
2.10.5. Zapobieganie wyładowaniom ślizgowym	94
2.11. Przykłady obliczeniowe	95

ROZDZIAŁ 3

Metody analizy pola elektrycznego w układach izolacyjnych	111
3.1. Wprowadzenie	111
3.2. Podstawowe równania pola elektrycznego	112
3.3. Charakterystyki pola elektrycznego do celów technicznych	114
3.4. Szczególne metody rozwiązywania równań pola elektrycznego	116
3.4.1. Metoda rozdzielania zmiennych	116
3.4.2. Metoda odwzorowań konforemnych	117
3.4.3. Metoda superpozycji	119

3.4.4. Metoda odbicia lustrzanego	122
3.4.5. Zastosowanie prawa Gaussa	123
3.4.6. Metody numeryczne	128
3.5. Przykłady zastosowania układów współrzędnych do wyznaczania rozkładów pola elektrycznego	129
3.5.1. Układy izolacyjne we współrzędnych kołowo-walcowych	130
3.5.2. Układy izolacyjne we współrzędnych sferycznych	134
3.5.2.1. Układ modelowy – metalowa wtrącina kulista w polu elektrycznym	135
3.5.2.2. Układ izolacyjny – dielektryczna wtrącina kulista w polu elektrycznym	140
3.5.3. Układ izolacyjny we współrzędnych toroidalnych	146
3.5.4. Układ izolacyjny we współrzędnych dwuwalcowych	151
3.5.4.1. Układ modelowy – elektrody walcowe niewspółosiowe	151
3.5.4.2. Współczynnik niejednostajności pola elektrycznego	155
3.5.5. Układ izolacyjny we współrzędnych eliptyczno-walcowych	157
3.5.5.1. Układ modelowy – elektrody eliptyczno-walcowe	157
3.5.5.2. Współczynnik niejednostajności pola elektrycznego	159
3.6. Modelowe układy współrzędnych	161
3.7. Przykłady obliczeniowe	165

ROZDZIAŁ 4

Rozkłady pola elektrycznego w modelowych układach izolacyjnych	181
4.1. Wprowadzenie	181
4.2. Układy izolacyjne w polu elektrycznym jednostajnym	182
4.2.1. Układ dwóch elektrod płaskich równoległych	182
4.2.2. Wpływ krawędzi elektrod na rozkład pola elektrycznego	184
4.2.3. Układy izolacyjne uwarstwione w polu elektrycznym jednostajnym	192
4.2.3.1. Uwarstwienie szeregowe dielektryków	192
4.2.3.2. Uwarstwienie równoległe dielektryków	195
4.3. Układy izolacyjne w polu elektrycznym niejednostajnym	196
4.3.1. Układy izolacyjne z elektrodami kulowymi	196
4.3.1.1. Układ elektrod typu <i>kula – płaszczyzna</i>	197
4.3.1.2. Układ elektrod typu <i>kule mimośrodkowe</i>	199
4.3.1.3. Układ elektrod typu <i>kule współśrodkowe</i>	201
4.3.2. Układy izolacyjne z elektrodami walcowymi	204
4.3.2.1. Układ elektrod typu <i>walec – płaszczyzna</i>	204
4.3.2.2. Układ elektrod typu <i>dwa walce mimoosiowe</i>	205
4.3.2.3. Układ elektrod typu <i>trzy walce mimoosiowe</i>	207
4.3.2.4. Układ elektrod typu <i>walce współosiowe</i>	208

4.3.3.	Układ izolacyjny z elektrodami typu <i>sworzeń – płaszczyzna</i>	211
4.3.4.	Układy izolacyjne z elektrodami ostrzowymi	213
4.3.4.1.	Rozkład pola elektrycznego w układzie elektrod typu <i>ostrze – płaszczyzna</i> (elektroda hiperboloidalna)	213
4.3.4.2.	Rozkład pola elektrycznego w układzie elektrod typu <i>pręt – płaszczyzna</i>	216
4.3.4.3.	Rozkład pola elektrycznego w układzie elektrod typu <i>ostrze – ostrze</i> (wzory uproszczone)	218
4.4.	Wpływ rodzaju napięcia a rozkład pola elektrycznego w układach izolacyjnych	218
4.4.1.	Rozkład pola elektrycznego w w warstwowych układach izolacyjnych w polu elektrycznym jednostajnym	219
4.4.2.	Warstwowy układ izolacyjny w polu elektrostatycznym	221
4.4.3.	Warstwowy układ izolacyjny przy napięciu stałym	222
4.4.4.	Warstwowy układ izolacyjny przy napięciu przemiennym	223
4.5.	Współdziałanie pola elektrycznego i cieplnego w układach izolacyjnych wysokiego napięcia	223
4.5.1.	Model układu izolacyjnego w polu elektrycznym jednostajnym przy oddziaływaniu pola cieplnego	224
4.5.2.	Model układu izolacyjnego w polu elektrycznym niejednostajnym przy oddziaływaniu pola cieplnego	226
4.6.	Podstawy doboru roboczego natężenia pola elektrycznego	234
4.6.1.	Wpływ kształtu elektrod na rozkład pola elektrycznego	234
4.6.2.	Wpływ niejednostajności pola elektrycznego na dobór roboczego natężenia pola	236
4.7.	Kształtowanie rozkładu pola elektrycznego	237
4.7.1.	Kształtowanie rozkładu pola elektrycznego wewnętrznego	237
4.7.1.1.	Układ izolacyjny jednorodny	238
4.7.1.2.	Układ izolacyjny niejednorodny	239
4.7.2.	Zewnętrzne pole elektryczne w modelowym układzie izolacyjnym	244
4.7.2.1.	Rozkład pola elektrycznego w punkcie potrójnym	244
4.7.2.2.	Model rzeczywistego układu izolacyjnego	245
4.7.2.3.	Wpływ rezystywności powierzchniowej i skrośnej materiału izolacyjnego na wartość napięcia początkowego wyładowań ślizgowych	249
4.7.3.	Kształtowanie rozkładu pola elektrycznego zewnętrznego w kierunku osiowym	250
4.7.3.1.	Wpływ warstwy półprzewodzącej na rozkład pola elektrycznego	251
4.7.3.2.	Warunki doboru natężenia pola elektrycznego w kierunku osiowym	254
4.7.4.	Wewnętrzne ekrany sterujące	259
4.8.	Przykłady obliczeniowe	261

ROZDZIAŁ 5

Straty dielektryczne w wysokonapięciowych materiałach elektroizolacyjnych	317
5.1. Wprowadzenie	317
5.2. Przewodnictwo elektryczne dielektryków polimerowych	318
5.3. Polaryzacja w dielektrykach	320
5.3.1. Charakterystyka mechanizmów polaryzacji	320
5.3.2. Polaryzacja orientacji	322
5.4. Stałe pole elektryczne	325
5.4.1. Przewodnictwo wewnętrznych własnych nośników ładunku	325
5.4.2. Przewodnictwo ładunków wprowadzonych	326
5.5. Zmienne pole elektryczne	329
5.5.1. Dielektryk niepolarny – straty przewodnościowe	330
5.5.2. Dielektryk polarny – straty polaryzacyjne	331
5.5.3. Dielektryk polarny – straty polaryzacyjne i straty przewodnościowe	335
5.6. Wielkości charakteryzujące straty dielektryczne	338
5.6.1. Współczynnik strat dielektrycznych	338
5.6.2. Straty dielektryczne przy napięciu odkształconym przez wyższe harmoniczne	340
5.6.3. Charakterystyki częstotliwościowe strat dielektrycznych	341
5.6.3.1. Charakterystyki współczynnika strat przewodnościowych i polaryzacyjnych	341
5.6.3.2. Charakterystyki dyspersyjne strat dielektrycznych	342
5.6.4. Zależność współczynnika strat dielektrycznych od napięcia	344
5.7. Przykłady obliczeniowe	346

ROZDZIAŁ 6

Próby wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych	411
6.1 Wprowadzenie	411
6.2. Poziomy izolacji urządzeń elektroenergetycznych	412
6.3. Napięcia probiercze w znormalizowanych próbach wytrzymałości elektrycznej	413
6.4. Charakterystyka prób wytrzymałości elektrycznej napięciem o częstotliwości sieciorowej	415
6.4.1. Warunki próby wytrzymałości elektrycznej	416
6.4.2. Zespoły probiercze napięcia przemiennego	416
6.4.2.1. Zespoły probiercze z pojedynczym transformatorem	416
6.4.2.2. Układy kaskadowe transformatorów	418
6.4.2.3. Moc znamionowa zespołów probierczych	419
6.5. Charakterystyka prób wytrzymałości elektrycznej napięciem udarowym	421
6.5.1. Parametry napięć udarowych	422

6.5.2. Napięcie udarowe piorunowe	422
6.5.3. Napięcie udarowe łączeniowe	424
6.5.4. Wytwarzanie napięć udarowych	424
6.5.4.1. Schemat zastępczy generatora jednostopniowego	424
6.5.4.2. Wielostopniowy generator napięć udarowych	427
6.5.5. Procedury prób napięciem udarowym piorunowym	430
6.5.6. Statystyczne napięcia wytrzymywane	431
6.6. Wytrzymałość elektryczna wielkich odstępów izolacyjnych (WOI)	432
6.6.1. Podstawy doboru odstępów izolacyjnych	432
6.6.2. Wytrzymałość elektryczna wielkich odstępów izolacyjnych przy napięciu udarowym łączeniowym	434
6.6.2.1. Wytrzymałość doziemna	434
6.6.2.2. Wytrzymałość międzyfazowa	436
6.6.3. Wytrzymałość elektryczna wielkich odstępów izolacyjnych przy napięciu udarowym piorunowym	440
6.6.4. Wytrzymałość elektryczna wielkich odstępów izolacyjnych przy napięciu przemiennym	441
6.6.5. Porównanie wytrzymałości elektrycznej doziemnej WOI przy napięciu udarowym łączeniowym i piorunowym oraz napięciu przemiennym	442
6.7. Koordynacja izolacji	442
6.7.1. Wymagania koordynacji izolacji	443
6.7.2. Procedury koordynacyjne	447
6.7.3. Statystyczna metoda koordynacji izolacji	448
6.7.3.1. Model rozkładu przepięć	448
6.7.3.2. Model rozkładu napięć wyładowania	451
6.8. Próby udarami prądowymi	454
6.8.1. Charakterystyka prądu wyładowania piorunowego	454
6.8.2. Rozkłady statystyczne parametrów wyładowania piorunowego	458
6.8.3. Wielkości normowane parametrów prądu pioruna	460
6.8.4. Próby udarami prądowymi	461
6.8.4.1. Znormalizowane udary prądowe	461
6.8.4.2. Generatory udarów prądowych	463
6.9. Przykłady obliczeniowe	469

ROZDZIAŁ 7

Napowietrzne elektroenergetyczne linie przesyłowe	519
7.1. Wprowadzenie	519
7.2. Modele elektryczne linii napowietrznych wysokich napięć	520
7.2.1. Schematy zastępcze elektroenergetycznych linii napowietrznych	520
7.2.2. Stosowane modele elektroenergetycznych linii napowietrznych	521

7.3.	Charakterystyki przesyłowe elektroenergetycznych linii napowietrznych	522
7.3.1.	Eksploatacyjne efekty energetyczne w liniach napowietrznych	522
7.3.2.	Typowe parametry napowietrznych linii przesyłowych	525
7.3.3.	Przewody linii napowietrznych	525
7.3.4.	Wpływ długości linii napowietrznej na jej zdolność przesyłową	526
7.3.5.	Przewody wiązkowe w liniach napowietrznych	528
7.4.	Układy izolacyjne wysokonapięciowych linii napowietrznych	532
7.4.1.	Wymagane znormalizowane odstępstwa izolacyjne	532
7.4.2.	Izolatory w wysokonapięciowych napowietrznych liniach przesyłowych	534
7.4.3.	Rodzaje wylądowań elektrycznych na izolatorach liniowych wiszących	536
7.4.4.	Kryteria zastosowania izolatorów w warunkach zabrudzeniowych	540
7.4.5.	Napięcia probiercze w znormalizowanych próbach wytrzymałości elektrycznej izolatorów	542
7.5.	Pole elektryczne pod liniami napowietrznymi wysokiego napięcia	543
7.5.1.	Napięcia znamionowe elektroenergetycznych linii napowietrznych	544
7.5.2.	Pole elektromagnetyczne pod liniami przesyłowymi wysokich napięć	545
7.5.3.	Metody obliczania natężenia pola elektrycznego pod liniami przesyłowymi wysokiego napięcia	547
7.5.4.	Podstawy fizyczne formułowania modeli linii napowietrznych wieloprzewodowych	548
7.5.4.1.	Model pojedynczego przewodu nad gruntem	549
7.5.4.2.	Model linii napowietrznej wieloprzewodowej	552
7.5.5.	Rozkład natężenia pola elektrycznego w jednoprzewodowej i dwuprzewodowej linii napowietrznej wysokiego napięcia	555
7.5.5.1.	Jednoprzewodowa linia napowietrzna	555
7.5.5.2.	Dwuprzewodowa linia napowietrzna napięcia stałego	557
7.5.6.	Procedury obliczania natężenia pola elektrycznego pod trójfazowymi liniami napowietrznymi	559
7.5.6.1.	Trójfazowa linia napowietrzna z przewodami wiązkowymi i dwoma przewodami odgromowymi	559
7.5.6.2.	Trójfazowa linia napowietrzna z przewodami wiązkowymi i jednym przewodem odgromowym	565
7.5.6.3.	Trójfazowa linia napowietrzna z przewodami wiązkowymi, jednym przewodem odgromowym i trzema przewodami ekranującymi zawieszonymi pod przewodami fazowymi	570
7.5.7.	Rozkłady i obrazy pola elektrycznego w otoczeniu napowietrznych linii przesyłowych	576
7.6.	Ulot elektryczny	582
7.6.1.	Charakterystyka zjawiska ulotu elektrycznego	583
7.6.2.	Wzory doświadczalne do obliczeń napięcia początkowego ulotu	587

7.6.3. Zasięg strefy ulotu elektrycznego	590
7.6.4. Skutki ulotu elektrycznego w liniach napowietrznych	594
7.7. Przykłady obliczeniowe	596

ROZDZIAŁ 8

Elektroenergetyczne linie kablowe	615
8.1. Wprowadzenie	615
8.2. Parametry elektryczne układu izolacyjnego kabli wysokiego napięcia	617
8.2.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego jednożyłowego kabla elektroenergetycznego	617
8.2.2. Rozkład pola elektrycznego w kablach wysokiego napięcia przemiennego i stałego	618
8.3. Kable wysokiego napięcia przemiennego	619
8.3.1. Układy izolacyjne jednorodne	619
8.3.2. Układy izolacyjne niejednorodne	623
8.3.3. Optymalizacja konstrukcji układów izolacyjnych kabli napięcia przemiennego	626
8.3.3.1. Porównanie układów izolacyjnych dwuwarstwowego i jednowarstwowego	626
8.3.3.2. Porównanie układów izolacyjnych dwuwarstwowego i jednowarstwowego z uwzględnieniem wielkości materiałowych i konstrukcyjnych	629
8.4. Kable wysokiego napięcia stałego	631
8.4.1. Systemy podstawowe kabli wysokiego napięcia stałego	631
8.4.2. Układ izolacyjny kabli wysokiego napięcia stałego	632
8.4.3. Pole elektryczne w izolacji kabli wysokiego napięcia stałego	633
8.4.3.1. Wpływ czynników eksploatacyjnych na wartości konduktywności elektrycznej materiałów izolacyjnych	633
8.4.3.2. Zależność temperaturowa i połowa konduktywności elektrycznej	634
8.4.4. Procedura obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego w izolacji kabla wysokiego napięcia stałego	635
8.5. Przykłady obliczeniowe	641

ROZDZIAŁ 9

Metody opracowywania wyników badań wysokonapięciowych układów izolacyjnych	683
9.1. Wprowadzenie	683
9.2. Opracowanie wyników pomiarów	684
9.2.1. Określenia podstawowe	684

9.2.2. Niepewność pomiaru	685
9.2.2.1. Ocena niepewności standardowej typu A	686
9.2.2.2. Ocena niepewności standardowej typu B	688
9.2.2.3. Niepewność całkowita	689
9.3. Parametry charakterystyczne rozkładów zmiennych losowych	689
9.4. Rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych losowych	690
9.4.1. Rozkłady zmiennych losowych dyskretnych	690
9.4.1.1. Rozkład równomierny	691
9.4.1.2. Rozkład dwumianowy	691
9.4.1.3. Rozkład geometryczny	693
9.4.1.4. Rozkład Poissona	693
9.4.2. Rozkłady zmiennych losowych ciągłych	694
9.4.2.1. Rozkład gamma uogólniony i przypadki szczególne	694
9.4.2.2. Rozkład równomierny	696
9.4.2.3. Rozkład normalny	697
9.4.2.4. Rozkład normalny ucięty lewostronnie w zerze	699
9.4.2.5. Logarytmiczny rozkład normalny	700
9.4.2.6. Rozkład Weibulla	702
9.4.2.7. Rozkład wykładniczy	710
9.4.2.8. Rozkład t -Studenta	711
9.4.2.9. Rozkład F -Snedecora	712
9.4.2.10. Rozkład χ^2	713
9.5. Przykłady obliczeniowe	715

ROZDZIAŁ 10

Rozwój przesyłu energii elektrycznej	753
---	------------

ROZDZIAŁ 11

Biogramy wynalazców, konstruktorów i teoretyków	763
--	------------

Literatura	785
-------------------------	------------

Spis wybranych oznaczeń	799
--------------------------------------	------------

Indeks	809
---------------------	------------