

Spis treści

Oznaczenia	11
1. Wiadomości ogólne	17
1.1. Wprowadzenie	17
1.2. Przyczyny i skutki zwarć	17
1.3. Cele obliczeń zwarciovych	22
1.4. Zagadnienia zwarciove w statystyce	24
1.5. Zwarcia a ekonomika	30
1.6. Jednostki względne	31
2. Przebiegi zwarciove i charakteryzujące je wielkości	36
2.1. Wprowadzenie	36
2.2. Zwarcie trójfazowe generatora synchronicznego	37
2.2.1. Wybrane prawa elektrotechniki	37
2.2.2. Prądy zwarciove przy pominięciu rezystancji uzwojeń	41
2.2.3. Prądy zwarciove przy uwzględnieniu rezystancji uzwojeń	45
2.2.4. Obrazy strumieni i reaktancje zastępcze	47
2.2.5. Wzory na prądy zwarciove	49
2.2.6. Wpływ asymetrii magnetycznej wirnika	52
2.2.7. Wpływ regulacji napięcia	55
2.2.8. Wpływ obciążenia wstępnego	57
2.3. Wielkości charakteryzujące prądy zwarciove	58
2.4. Zwarcia dwufazowe	60
2.4.1. Prądy zwarciove	60
2.4.2. Wpływ asymetrii magnetycznej wirnika	65
2.5. Wpływ lokalizacji zwarcia	67
2.6. Zwarcie zacisków silnika indukcyjnego	70
2.7. Specyfika zwarć doziemnych	73
2.7.1. Zwarcie i wyłączenie zwarcia w obwodzie z pojemnościami	74
2.7.2. Zwarcie w sieci z izolowanym punktem neutralnym	77
2.7.3. Zwarcie w sieci z punktem neutralnym uziemionym za pomocą dławika	86

2.7.4. Zwarcie w sieci z punktem neutralnym uziemionym za pomocą rezystora	91
2.7.5. Zwarcie w sieci z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio	93
2.8. Rezystancja w miejscu zwarcia (rezystancja przejścia)	94
2.9. Połączenia prądu stałego	97
2.9.1. Układy połączeń prądu stałego i ich regulatory	98
2.9.2. Zwarcie po stronie prądu stałego	101
2.9.3. Zwarcie w systemie prądu przemiennego po stronie prostownika	103
2.9.4. Zwarcie w systemie prądu przemiennego po stronie falownika	104
2.10. Wpływ farm wiatrowych na zwarcia w sieci	106
2.10.1. Zwarcia bliskie	106
2.10.2. Zwarcia odległe	117
3. Metoda składowych symetrycznych	119
3.1. Wprowadzenie	119
3.2. Trójfazowy element sieciowy	120
3.3. Wartości i wektory własne macierzy	122
3.4. Przekształcenie 0, 1, 2	124
3.5. Interpretacja elektryczna składowych symetrycznych	127
3.6. Impedancje sieci składowych symetrycznych	134
3.7. Moc pozorna w składowych fazowych i symetrycznych	137
3.8. Inne przekształcenia	137
4. Modele elementów systemu elektroenergetycznego	139
4.1. Wprowadzenie	139
4.2. Generatory synchroniczne	139
4.2.1. Schematy zastępcze we współrzędnych d, q	140
4.2.2. Schematy zastępcze dla składowych symetrycznych	144
4.2.3. Schematy zastępcze przy pominięciu asymetrii wirnika	147
4.3. Napowietrzne linie elektroenergetyczne	148
4.3.1. Modele dla stanów ustalonych i nieustalonych wolnozmiennych	148
4.3.2. Pojęcie obwodu ziemnopowrotnego	153
4.3.4. Modelowanie wpływu przewodów odgromowych i wiązkowych	163
4.3.5. Modelowanie linii dwutorowych i wielotorowych	170
4.3.6. Specyfika linii niskiego napięcia	177
4.3.7. Linie napowietrzne SN wykonane przewodami izolowanymi	179
4.3.8. Wyznaczanie pojemności linii napowietrznych	179
4.3.9. Fizyczny, trójfazowy model linii napowietrznej	183
4.3.10. Parametry typowych linii napowietrznych WN i NN spotykanych w elektroenergetyce krajowej	183
4.4. Linie kablowe	187
4.4.1. Parametry podłużne linii kablowych	189
4.4.2. Parametry poprzeczne linii kablowych	200
4.5. Transformatory energetyczne	203
4.5.1. Dwa uzwojenia sprzęgnięte magnetycznie	203
4.5.2. Przykładowe parametry transformatorów	208
4.5.3. Modele transformatorów dwu- i trójuzwojeniowych dla składowej zgodnej	211

4.5.4. Modele transformatorów dwu- i trójzwojeniowych dla składowej zerowej	221
4.5.5. Modele transformatorów wielozwojeniowych	233
4.5.6. Modele przesuwników fazowych	245
4.5.7. Transformacja prądów zwarciovych	272
4.6. Odbiory	283
4.6.1. Odbiory kompleksowe	283
4.6.2. Silniki indukcyjne	283
4.6.3. Silniki synchroniczne	284
4.7. Modele OZE do analiz zwarciovych	285
4.7.1. Modelowanie farm wiatrowych	285
4.7.2. Modelowanie farm fotowoltaicznych	287
4.8. Podsystemy zewnętrzne	287
4.9. Rezystancja łuku zwarciovego	292
5. Zwarcia w sieciach z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym	299
5.1. Wprowadzenie	299
5.2. Zwarcia pojedyncze	299
5.2.1. Zwarcie trójfazowe	300
5.2.2. Zwarcie jednofazowe	304
5.2.3. Zwarcie dwufazowe	312
5.2.4. Zwarcie dwufazowe z ziemią	315
5.2.5. Zestawienie wzorów	322
5.2.6. Zwarcia w innych fazach	322
5.2.7. Przykłady obliczeń	325
5.3. Przerwy w fazach	337
5.3.1. Przerwa w trzech fazach	338
5.3.2. Przerwa w dwóch fazach	339
5.3.3. Przerwa w jednej fazie	341
5.4. Zakłócenia wielokrotne	343
5.4.1. Zwarcia podwójne dwumiejscowe	344
5.4.2. Podwójne zwarcie jednofazowe	346
5.4.3. Inne zakłócenia wielokrotne	351
6. Zwarcia doziemne w sieciach SN	353
6.1. Wprowadzenie	353
6.2. Sieci z izolowanym punktem neutralnym	360
6.3. Sieci z punktem neutralnym uziemionym przez dławik	368
6.4. Sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor	374
7. Zalecenia normatywne	381
7.1. Wprowadzenie	381
7.2. Standaryzacja obliczeń zwarciovych	382
7.3. Obliczenia według normy PN-74/E-05002	383
7.4. Ogólna charakterystyka normy PN-EN 60909-0	384
7.4.1. Podstawowe definicje, symbole i założenia	384

7.4.2. Modelowanie elementów sieci	387
7.4.3. Specyfika obliczeń zwarć w pobliżu generatorów	391
7.4.4. Uwzględnianie wpływu silników indukcyjnych na prąd zwarcia	391
7.5. Obliczanie wielkości zwarciovych według zaleceń normy PN-EN 60909-0	392
7.5.1. Początkowy symetryczny prąd zwarcia	392
7.5.2. Zwarcia dwufazowe	397
7.5.3. Zwarcia dwufazowe z ziemią	398
7.5.4. Zwarcie jednofazowe z ziemią	399
7.5.5. Udarowy prąd zwarcia	399
7.5.6. Prąd wyłączeniowy	403
7.5.7. Ustalony prąd zwarcia	407
7.6. Obliczanie cieplnego efektu prądu zwarcia	409
7.7. Podstawy teoretyczne metody korygowania wartości impedancji elementów	412
8. Metody ograniczania prądów zwarcia	414
8.1. Wprowadzenie	414
8.2. Metody związane z powiększaniem impedancji zwarciowej	417
8.2.1. Dławiki zwarciowe	417
8.2.2. Transformatory z uzwojeniami dzielonymi	419
8.2.3. Kształtowanie struktury sieci	421
8.3. Urządzenia ograniczające wartość prądu zwarcia	423
8.3.1. Bezpieczniki i ograniczniki	423
8.3.2. Sprzęgła rezonansowe	424
8.3.3. Szybkie łączniki tyrystorowe	424
8.3.4. Elementy nieliniowe wyzwalane temperaturowo	425
9. Przykłady obliczeń zwarciovych	433
9.1. Wprowadzenie	433
9.2. Analiza zwarć trójfazowych w prostych układach sieciowych	434
9.3. Wyznaczanie wielkości zwarciovych w prostych układach sieciowych	436
9.4. Wyznaczanie wielkości zwarciovych dla zwarć niesymetrycznych	442
9.5. Wymiana transformatora 110/SN na jednostkę o większej mocy – konsekwencje zwarciove	457
9.6. Analiza zwarć między generatorem a transformatorem blokowym	460
9.7. Analiza zwarciova z udziałem źródeł OZE	462
9.8. Analiza zwarciova w złożonych układach sieciowych	473
10. Obliczenia komputerowe	495
10.1. Wprowadzenie	495
10.2. Macierzowe równia sieci	496
10.2.1. Równania węzłowe	496
10.2.2. Łączenie sieci	499
10.2.3. Przekształcanie sieci przez eliminację węzłów	501
10.2.4. Związki między macierzą admitancyjną i impedancyjną	505
10.3. Modelowanie i analiza zwarć w sieci wielowęzłowej	509

10.3.1. Zależności podstawowe	509
10.3.2. Wyznaczanie prądów w miejscu zwarcia	512
10.3.3. Rozpływ prądów zwarciovych	515
10.3.4. Impedancja Thevenina widziana z dwóch węzłów sieci	520
10.4. Wyznaczanie macierzy impedancyjnej metodą przyłączania gałęzi	523
10.4.1. Metoda El-Abiada	523
10.4.2. Dodanie nowego węzła w istniejącej gałęzi	529
10.5. Zastosowanie faktoryzacji macierzy admitancyjnej węzłowej	531
10.5.1. Podstawy metody faktoryzacji	532
10.5.2. Uwagi o realizacji numerycznej algorytmu faktoryzacji	537
10.5.3. Technika macierzy rzadkich	541
10.6. Obliczanie parametrów ekwiwalentów zwarciovych	546
10.6.1. Zależności matematyczne	546
10.6.2. Zastosowanie metody przyłączania gałęzi	547
10.6.3. Zastosowanie metody faktoryzacji	547
10.6.4. Problemy wymiany ekwiwalentów	547
10.7. Przykład programu zwarciovego	549
10.7.1. Program SCC – uwagi wstępne	551
10.7.2. Program SCC – dane wejściowe	552
10.7.3. Program SCC – obsługa	565
10.7.4. Program SCC – obliczenia zwarciove	571
11. Symulacyjne wyznaczanie przebiegów zwarciovych	579
11.1. Wprowadzenie	579
11.2. Generatory synchroniczne i wzбудnice	583
11.2.1. Generatory synchroniczne	583
11.2.2. Wzbudnice i regulatory napięcia generatorów synchronicznych	595
11.3. Silniki	600
11.4. Linie elektroenergetyczne	607
11.4.1. Modele trójfazowe wykorzystujące elementy skupione	607
11.4.2. Modele składowych symetrycznych wykorzystujące elementy skupione	608
11.4.3. Modele łańcuchowe	609
11.4.4. Modele falowe	611
11.5. Transformatory	615
11.5.1. Modele składowych symetrycznych wykorzystujące elementy skupione	615
11.5.2. Modele trójfazowe wykorzystujące elementy skupione	619
11.6. Łuk elektryczny	621
11.6.1. Dynamiczny model łuku pierwotnego	621
11.6.2. Statyczny model łuku pierwotnego	626
11.6.3. Dynamiczny model łuku wtórnego	628
11.7. Farmy wiatrowe	632
11.7.1. Turbiny wiatrowe	633
11.7.2. Elektrownia wiatrowa z prądnicą indukcyjną dwustronnie zasilaną	634
11.7.3. Elektrownia wiatrowa z prądnicą synchroniczną	646
11.8. Elektrownie fotowoltaiczne	651
11.9. Numeryczne aplikacje modeli	656
11.9.1. Numeryczne rozwiązywanie równań różniczkowych	656

11.9.2. Numeryczne rozwiązywanie równań różniczkowo-algebraicznych	660
11.9.3. Różnicowe modele elementów sieci	661
11.9.4. Różnicowe równania sieci	667
11.10. Programy symulacyjne	669
11.11. Przykłady symulacji	690
11.11.1. Zwarcia w linii jednotorowej WN	691
11.11.2. Zwarcia w linii dwutorowej WN	700
11.11.3. Zwarcia doziemne w sieci SN	703
11.11.4. Zwarcie w sieci z przesyłem prądem stałym (HVDC)	708
11.11.5. Zwarcie wewnętrzne w transformatorze	712
11.11.6. Zwarcie w układzie z generatorem synchronicznym	713
11.11.7. Zwarcie w układzie z elektrownią wiatrową	715
11.11.8. Zwarcie w układzie z farmą fotowoltaiczną	719
11.12. Symulatory działające w czasie rzeczywistym	725
Literatura	741
D. Systemy testowe	755
D.1. System testowy 3G	755
D.2. System testowy 7G	757
D.3. System testowy New England	760
D.4. System testowy KZ	767
D.5. System testowy EC	768
O autorach	773