

Spis treści

Oznaczenia.....	H
-----------------	---

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 wzglęдне.....	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 trójzwojeniowych dla składowej zgodnej	211

Spis treści

4.5.4. Modele transformatorów dwu-i trójzwojennych dla składowej zerowej	221
4.5.5. Modele transformatorów wielozwojennych.....	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 zwarciove.....	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 zwarciovie.....	571
11. Symulacyjne wyznaczanie przebiegów zwarciovych.....	579
11.1. Wprowadzenie.....	579
11.2. Generatory synchroniczne i wzbudnice.....	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