

Spis treści

Wstęp	9
Oznaczenia	12
1. Elektroenergetyka – początki odległe, ale terminologia znajoma	17
2. System elektroenergetyczny – podstawowe elementy, właściwości, terminologia	20
2.1. Energetyka i elektroenergetyka – historia i teraźniejszość w ujęciu statystycznym	20
2.2. Meandry jednostek fizycznych stosowanych w energetyce	38
2.3. Elektrownie ciepłne	42
2.3.1. Wprowadzenie	42
2.3.2. Elektrownie parowe konwencjonalne	42
2.3.3. Elektrownie z turbinami i silnikami gazowymi	47
2.3.4. Elektrownie jądrowe	57
2.4. Odnawialne źródła energii	62
2.4.1. Wprowadzenie	62
2.4.2. Elektrownie wodne	64
2.4.3. Elektrownie wiatrowe	70
2.4.4. Elektrownie fotowoltaiczne	77
2.5. Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce – trendy i polityka	83
2.5.1. Struktura wytwarzania energii elektrycznej w Polsce	83
2.5.2. Transformacja energetyczna – plany i oczekiwania	86
2.6. Hierarchiczna struktura systemu elektroenergetycznego	92
2.6.1. Informacje podstawowe, statystyka	92
2.6.2. Sieć przesyłowa	94
2.6.3. Sieci dystrybucyjne	98
3. Budowa i modelowanie elementów systemu elektroenergetycznego	105
3.1. Wiadomości podstawowe	105
3.2. Jednostki względne	107
3.3. Składowe symetryczne	112
3.4. Urządzenia wytwórcze – źródła	122
3.4.1. Generatory synchroniczne	123

3.4.2. Generatory asynchroniczne (indukcyjne)	127
3.4.3. Źródła współpracujące z inwerterami	131
3.5. Linie elektroenergetyczne	132
3.5.1. Linie napowietrzne – wiadomości podstawowe	132
3.5.2. Modelowanie linii dla stanów symetrycznych	139
3.5.3. Modelowanie linii napowietrznych dla stanów niesymetrycznych	154
3.5.4. Parametry typowych linii napowietrznych SN, WN i NN spotykanych w elektroenergetyce krajowej	176
3.5.5. Linie kablowe	180
3.5.6. Pomiarowe wyznaczanie impedancji linii	191
3.6. Transformatory i autotransformatory	193
3.6.1. Wiadomości podstawowe	193
3.6.2. Transformatory dwuuzwojeniowe	197
3.6.3. Transformatory trójuzwojeniowe	203
3.6.4. Transformatory czterouzwojeniowe	207
3.6.5. Autotransformatory	211
3.6.6. Modelowanie transformatorów w niesymetrycznych stanach pracy	213
3.6.7. Przesuwniki fazowe	222
3.7. Obciążalność linii i transformatorów	225
3.7.1. Obciążalność przewodów linii elektroenergetycznych	225
3.7.2. Obciążalność transformatorów energetycznych	246
3.8. Odbiory	249
3.9. Dławiki i baterie kondensatorów	252
3.10. System zastępczy (ekwiwalentny)	254
3.11. Linie prądu stałego	254
3.12. Magazyny energii	257
3.13. Stacje i rozdzielnie	264
3.13.1. Wiadomości podstawowe	264
3.13.2. Układy połączeń stacji	266
3.13.3. Pola rozdzielcze	273
4. Problemy napięciowe w systemie elektroenergetycznym	277
4.1. Spadki, straty i odchylenia napięcia	278
4.2. Regulacja napięcia	294
4.2.1. Regulacja napięcia za pomocą napięć dawczych	295
4.2.2. Regulacja napięcia za pomocą zmiany impedancji sieci	301
4.2.3. Regulacja napięcia za pomocą zmiany rozpliwów mocy biernej	302
4.3. Ograniczenia napięciowe energetyki odnawialnej	305
5. Straty mocy i energii w sieciach elektroenergetycznych	307
5.1. Straty mocy	307
5.1.1. Straty mocy w liniach elektroenergetycznych	307
5.1.2. Straty mocy w transformatorach elektroenergetycznych	309
5.1.3. Energetyczny równoważnik mocy biernej	313
5.2. Straty energii	315
5.3. Bilans strat energii spółki dystrybucyjnej	319
5.4. Straty wynikające z asymetrii obciążenia w sieciach niskich napięć	321

5.5. Kompensacja mocy biernej – aspekty techniczne i ekonomiczne	322
5.5.1. Zależności podstawowe	322
5.5.2. Dobór układu i pojemności kondensatorów	326
5.5.3. Sposób naliczania opłat karnych za ponadumowny pobór mocy biernej	327
6. Rozpływy mocy w systemie elektroenergetycznym	329
6.1. Wiadomości podstawowe	329
6.2. Zależności podstawowe	330
6.3. Metody służące do wyznaczania rozplądów mocy	337
6.3.1. Metoda Newtona–Raphsona	338
6.3.2. Metoda stałoprądowa	358
7. Optymalizacja stanów pracy SEE	366
7.1. Wiadomości podstawowe	366
7.2. Ogólna postać zadania optymalizacji	372
8. Zakłócenia w systemach elektroenergetycznych	379
8.1. Wprowadzenie	379
8.2. Podstawowe informacje o zakłóceniach zwarciowych	379
8.3. Teoretyczne podstawy wyznaczenia prądów zwarć symetrycznych i niesymetrycznych	395
8.3.1. Zwarcie trójfazowe	395
8.3.2. Zwarcia niesymetryczne	399
8.3.3. Maksymalne wartości prądów zwarcia	405
8.3.4. Warunek skuteczności uziemienia punktu neutralnego sieci	407
8.4. Obliczanie wielkości zwarciowych wg PN-EN- 60909-0	409
8.5. Problematyka zwarć z ziemią w sieciach średniego napięcia	418
8.6. Przerwy w fazach	425
8.7. Zakłócenia wielokrotne	428
8.7.1. Podwójne zwarcie jednofazowe	428
8.7.2. Zwarcie wraz z przerwą w jednej fazie	431
8.8. Ograniczanie prądów zwarcia	432
8.9. Metody numeryczne obliczania prądów zwarcia	435
8.9.1. Wprowadzenie	435
8.9.2. Macierzowe równania sieci	436
8.9.3. Bifaktoryzacja – podstawowa metoda wyznaczania elementów macierzy impedancyjnej	444
9. Problematyka przyłączeniowa	447
9.1. Identyfikacja problemów związanych z przyłączaniem do sieci instalacji OZE	447
9.2. Ograniczenia sieciowe	451
9.2.1. Sieć przesyłowa i 110 kV	451
9.2.2. Sieć średniego napięcia	458
9.2.3. Sieć niskiego napięcia – prosumenci	462
9.3. Problemy bilansowania SEE z dużym udziałem generacji odnawialnej	467
9.3.1. Redysponowanie nierynkowe – nowa rzeczywistość w skali masowej	467
9.3.2. Ocena ryzyka ograniczenia generacji z OZE	468
9.4. NC RfG – podstawowe wymagania dla otrzymania FON	480
9.5. Przyszły system elektroenergetyczny – kluczowa rola inwerterów GFM	482

10. Stabilność systemu elektroenergetycznego	487
10.1. Wiadomości podstawowe	487
10.2. Stabilność kątowna	488
10.3. Stabilność napięciowa	496
10.4. Stabilność częstotliwościowa	503
10.5. Blackout, obrona przed awarią katastrofalną, restytucja poawaryjna	507
10.5.1. Wiadomości podstawowe	507
10.5.2. Obrona przed awarią katastrofalną	509
10.5.3. Odbudowa zdolności wytwórczych źródeł po wystąpieniu awarii katastrofalnej	511
11. Podstawy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej	513
11.1. Wiadomości podstawowe	513
11.2. Zabezpieczenia linii	514
11.3. Zabezpieczenia transformatorów	522
11.4. Zabezpieczenia generatorów synchronicznych	528
11.5. Zabezpieczenia silników elektrycznych	532
11.6. Zabezpieczenia źródeł generacji rozproszonej	535
12. Jakość energii elektrycznej	539
12.1. Problemy ogólne	539
12.2. Szczegółowe wymagania w zakresie jakości energii	541
12.3. Przykłady oceny jakości energii	548
13. Przykłady oprogramowania komputerowego stosowanego w elektroenergetyce	555
Bibliografia	559