

Spis treści

Od Autorów	13
Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli	15
1. Wprowadzenie	21
1.1. Wstęp	21
1.2. Turbiny wiatrowe	26
1.2.1. Wpływ turbin wiatrowych na systemem elektroenergetyczny	30
1.2.2. Poziomy mocy w węzłach oraz przepływy mocy	33
1.2.3. Wartość napięcia	37
1.2.4. Harmoniczne prądu i napięcia	41
1.2.5. Wahania napięcia	43
1.3. Elektrownie fotowoltaiczne (PV)	45
1.3.1. Ogniwa fotowoltaiczne	45
1.3.2. Zastosowania instalacji PV	46
1.3.3. Warunki rozwoju instalacji PV w Polsce	47
1.4. Elektrownia hybrydowa	48
1.5. Przyłączenie źródeł odnawialnych do sieci elektroenergetycznych	49
1.5.1. Zasady finansowania przyłączenia	54
1.5.2. Sposoby przyłączania źródeł odnawialnych do sieci elektroenergetycznych	55
1.5.2.1. Przyłączenie do sieci niskiego napięcia	56
1.5.2.2. Przyłączenie do sieci średniego napięcia	57
1.5.2.3. Przyłączenie do sieci wysokiego napięcia	57
1.6. Kryteria przyłączania oze do sieci elektroenergetycznej nN i SN	59
1.7. Wyznaczanie maksymalnej dostępnej mocy źródła	62
1.8. Przyłączenie instalacji fotowoltaicznych	63
1.9. Przyłączenie elektrowni hybrydowych	64
LITERATURA	66

2. Kompensacja mocy biernej i stabilizacja napięcia	69
2.1. Wprowadzenie	69
2.2. Kompensacja mocy biernej farm wiatrowych	70
2.2.1. Wymagania operatorów sieci dystrybucyjnej	71
2.2.2. Regulacja napięcia i mocy biernej w normalnych stanach pracy	72
2.3. Praca ze stałym współczynnikiem mocy	78
2.3.1. Praca z $\cos\varphi = 1$	78
2.3.2. Indukcyjny współczynnik mocy	79
2.3.3. Pojemnościowy współczynnik mocy	82
2.4. Stabilizacja napięcia	84
2.5. Praca ze stałą mocą bierną	86
2.6. Inne metody sterowania	88
2.7. Charakterystyki stosowanych turbin wiatrowych z punktu widzenia kompensacji mocy biernej	88
2.7.1. Elektrownia wiatrowa z generatorem asynchronicznym pierścieniowym dwustronnie zasilanym (DFIG)	88
2.7.2. Elektrownia wiatrowa z generatorem synchronicznym (FCI)	90
2.7.3. Przykład 2.1	93
2.7.4. Przykład 2.2	93
2.7.5. Przykład 2.3	97
2.8. Regulacja napięcia i mocy biernej w stanach awaryjnych	99
2.9. Regulacja mocy biernej instalacji fotowoltaicznych	104
2.10. Kompensatory mocy biernej	107
2.10.1. Baterie kondensatorów załączane stycznikami	107
2.10.2. Przykład 2.4	114
2.10.3. Baterie kondensatorów załączane łącznikami tyrystorowymi (TSC)	120
2.10.4. Załączanie dławików	125
2.10.5. Kompensator ze stałą baterią kondensatorów i dławikami z kontrolowanym, za pomocą łączników tyrystorowych prądem biernym	127
2.10.6. Kompensator STATCOM	150
2.10.7. Zastosowanie układów energoelektronicznych z szeregowym falownikiem napięcia	171
LITERATURA	195
3. Monitorowanie warunków dostawy energii elektrycznej	205
3.1. Wprowadzenie	205
3.2. Pomiar parametrów jakości energii	206
3.2.1. Rodzaje przyrządów pomiarowych	206

3.2.2. Implementacja pomiaru wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej	208
3.3. Badania porównawcze wskazań analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej	224
3.4. Zagregowane wskaźniki jakości dostawy energii	231
3.4.1. Koncepcja zagregowanych wskaźników jakości.....	231
3.4.2. Całkowity wskaźnik jakości napięcia	232
3.4.3. Składowe całkowitego wskaźnika jakości napięcia	233
3.4.4. Implementacja pomiaru grupowych wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej	238
3.5. Lokalizacja źródeł wahań napięcia	240
3.5.1. Podstawowe założenia jednopunktowych metod lokalizacji zaburzeń	241
3.5.2. Korelacja zmian P_{st} i mocy i/lub prądu (Metoda I)	241
3.5.3. Badanie nachylenia charakterystyki napięciowo-prądowej (Metoda II)	242
3.5.4. Badanie kierunku przepływu mocy interharmonicznych (Metoda III).....	242
3.5.5. Analiza „mocy wahań napięcia” (Metoda IV)	244
3.5.6. Weryfikacja symulacyjna jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia	246
3.5.7. Weryfikacja laboratoryjna jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia	266
3.6. Ocena indywidualnej emisji zaburzeń	271
3.6.1. Ocena poziomu emisji wahań na podstawie pomiarów porównawczych	272
3.6.2. Ocena poziomu emisji wahań na podstawie analizy statystycznej	272
3.6.3. Pomiary poziomu emisji wahań napięcia	275
3.6.4. Pomiarowa ocena poziomu emisji harmonicznych	282
3.7. Propagacja wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym.....	285
3.7.1. Propagacja wahań napięcia z sieci WN do sieci SN	287
3.7.2. Sieć obciążona odbiornikami o stałej impedancji zastępczej	289
3.7.3. Sieć obciążona odbiornikami o impedancji zależnej od wartości napięcia	291
3.7.4. Propagacja wahań napięcia w sieci z odbiornikami statycznymi i wirującymi	294
3.7.5. Wpływ mocy silnika na poziom tłumienia wahań	294
3.7.6. Wpływ liczby silników na poziom tłumienia wahań napięcia.....	295

3.7.7. Wpływ charakteru i wartości momentu obciążenia silnika na poziom tłumienia wahań napięcia	295
3.7.8. Wpływ zmian charakterystyki momentu napędowego turbiny na poziom wahań napięcia	296
3.7.9. Wpływ częstotliwości zmian napięcia na poziom tłumienia wahań	298
3.7.10. Wpływ częstotliwości wahań emitowanych przez różne źródła na sumaryczny poziom zaburzenia	299
3.7.11. Propagacja wahań napięcia w układach rzeczywistych	300
LITERATURA	302

4. Rozproszone systemy

monitorowania wskaźników jakości dostawy energii	307
4.1. Wprowadzenie	307
4.2. Struktura rozproszonego systemu monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej	316
4.3. Analizator jakości energii elektrycznej	322
4.3.1. Certyfikat zgodności z normą PN EN 61000-4-30	330
4.4. Analiza, interpretacja i raporowanie wyników pomiaru wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej	332
4.5. Testowy system monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej w Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica (AGH).....	343
4.6. Rozproszony system ciągłego monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej w punktach przyłączenia rozproszonych i odnawialnych źródeł energii – wirtualne hybrydowe źródło energii	345
4.6.1. Opis punktów pomiarowych	349
4.6.1.1. Farma wiatrowa – Sierpc (S1).....	349
4.6.1.2. Farma fotowoltaiczna – Kraków (M1)	350
4.6.1.3. Generator biogazowy – Kraków (M2)	351
4.6.1.4. Turbina wodna – Siersza (M3).....	351
4.6.1.5. Farma fotowoltaiczna – Ruda Śląska (R1)	352
4.6.1.6. Turbina wiatrowa – Lipie	353
4.6.1.7. Elektrownia fotowoltaiczna typu tracker – Lipie (L2)	353
4.6.1.8. Farma fotowoltaiczna – Warszawa (W1).....	354
4.6.2. System monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej – środowisko WinPQ	355
4.6.3. Przykładowa analiza jakości dostawy energii elektrycznej dla wybranych obiektów	361
4.7. Integracja danych pochodzących od różnych przyrządów pomiarowych	375

4.7.1. Struktura bazy danych	378
4.7.2. Przepływ danych	379
4.7.3. Opis formatów pozyskiwanych danych	379
4.7.3.1. Pliki w formacie PQDIF	379
4.7.3.2. Pliki w formacie COMTRADE	381
4.7.3.3. Pliki txt, csv	382
4.7.3.4. Dane pozyskiwane bezpośrednio z bazy danych	383
4.8. Wirtualne hybrydowe źródło energii elektrycznej – wirtualny bilans energetyczny	383
4.8.1. Analiza pracy punktów pomiarowych	384
4.8.2. Analiza efektywności produkcji energii elektrycznej	387
4.8.3. Moc hybrydowej elektrowni	390
4.8.4. Wirtualne bilansowanie	391
LITERATURA	392
5. Prognozowanie generacji energii ze źródeł odnawialnych	395
5.1. Wprowadzenie	395
5.1.1. Modele prognozowania generacji energii farmy wiatrowej	395
5.1.2. Model predykcji produkcji energii za pomocą sztucznej sieci neuronowej	396
5.2. Badania praktyczne elektrowni wiatrowych	399
5.2.1. Prognozowanie generowanej energii przez elektrownię wiatrową FW 1 za pomocą sieci neuronowej	400
5.2.1.1. Badanie wpływu czynników zewnętrznych na pracę elektrowni	400
5.2.1.2. Prognozowanie produkcji energii elektrycznej podczas pracy elektrowni z pełną mocą	403
5.2.1.3. Budowa i badanie modelu uwzględniającego ograniczoną liczbę pracujących turbin	411
5.2.2. Prognozowanie pracy elektrowni wiatrowej FW 2 za pomocą sieci neuronowej	416
5.2.3. Prognozowanie generowanej energii elektrowni wiatrowej FW 3 za pomocą sieci neuronowej	427
5.2.3.1. Badanie wpływu czynników zewnętrznych na pracę elektrowni	428
5.2.3.2. Wpływ kierunku wiatru na krzywą mocy elektrowni	430
5.2.3.3. Rozkład prędkości wiatru wewnątrz farmy wiatrowej	431
5.2.3.4. Prognozowanie produkcji energii elektrycznej podczas pracy elektrowni z pełną mocą	436

5.3. Modele predykcji produkcji energii za pomocą sztucznej sieci neuronowej dla instalacji fotowoltaicznej	448
5.4. Badania praktyczne PV	448
5.4.1. Instalacja PV1	448
5.4.2. Wpływ warunków meteorologicznych na pracę instalacji PV	450
5.4.3. Prognozowanie produkcji energii elektrycznej instalacji PV1	451
5.4.4. Instalacja PV2	453
5.4.5. Prognozowanie produkcji energii elektrycznej instalacji PV2	454
5.5. Wiarygodność prognozowania pogody	455
5.5.1. Promieniowanie słoneczne	456
5.5.2. Prędkość wiatru	456
5.5.3. Temperatura	456
5.5.4. Wilgotność	457
5.5.5. Opad	457
LITERATURA	458
6. Modelowanie elektrowni hybrydowej	461
6.1. Opis projektu	461
6.2. Model systemu	463
6.2.1. System fotowoltaiczny (PV)	463
6.2.1.1. Charakterystyki nasłonecznienia	466
6.2.1.2. Charakterystyki energetyczne modelowanej elektrowni fotowoltaicznej	467
6.2.2. Elektrownia wiatrowa (EW)	469
6.2.2.1. Charakterystyki wiatru	470
6.2.2.2. Charakterystyki energetyczne elektrowni wiatrowej	471
6.2.3. Charakterystyki energetyczne elektrowni hybrydowej	472
6.2.4. Zasobnik energii (ZE)	472
6.3. Symulacja rozplywów mocy	478
6.3.1. Przykładowe wyniki obliczeń rozplywów mocy	479
6.3.2. Wnioski	487
LITERATURA	488
7. Badania nad zasobnikiem energii jako element gry na rynku energii	491
7.1. Wprowadzenie	491
7.2. Ryzyko na rynku energii	492
7.2.1. Ryzyko otwartej pozycji	493
7.2.2. Własności cen energii	495
7.2.2.1. Towarowa Giełda Energii	495
7.2.2.2. Własności cen energii na rynku RDN	498

7.3. Podejmowanie decyzji inwestycyjnych	504
7.3.1. Kryteria oceny projektów inwestycyjnych	505
7.3.2. Wartość dzisiejsza netto NPV	505
7.3.3. Wewnętrzna stopa zwrotu.....	507
7.3.4. Wycena projektów inwestycyjnych OZE.....	507
7.3.5. Wycena zasobnika energii elektrycznej	509
7.3.6. Warunki istnienia arbitrażu	510
7.4. Metoda opcji realnych w wycenie zasobnika	517
7.4.1. Wady klasycznych metod wyceny projektów inwestycyjnych	517
7.4.2. Opcje realne w wycenie zasobnika	518
LITERATURA	520

ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK A Przykładowa analiza finansowa instalacji PV	523
A1. Założenia i metodyka	523
A2. Podstawowe założenia analizy	523
A3. Metody analizy	524
A4. Warianty analizy	525
A5. Wyniki analiz	526
A6. Wnioski	529