

# Spis treści

---

<b>1. Rozwój rozproszonych źródeł energii . . . . .</b>	<b>15</b>
Łukasz TOPOLSKI	
1.1. Definicja rozproszonych źródeł energii . . . . .	16
1.2. Rozproszone źródła energii w świecie . . . . .	17
1.3. Rozproszone źródła energii w Europie. . . . .	23
1.4. Rozproszone źródła energii w Polsce . . . . .	27
Literatura . . . . .	37
<b>2. Sieci dystrybucyjne a rozwój RZE . . . . .</b>	<b>42</b>
Zbigniew HANZELKA	
2.1. Wprowadzenie . . . . .	42
2.2. Poziom nasycenia sieci elektroenergetycznych RZE . . . . .	43
2.3. Wpływ RZE na rynek energii . . . . .	43
2.4. Wpływ RZE na planowanie i zarządzanie majątkiem sieciowym . . . . .	44
2.5. Wzrost liczby danych. . . . .	45
2.6. Wpływ RZE na zasady projektowania sieci . . . . .	46
2.6.1. Przeciżenia termiczne elementów sieci. . . . .	47
2.6.2. Regulacja napięcia . . . . .	48
2.6.3. Wzrost mocy zwarciowej. . . . .	49
2.6.4. Układy sterowania i automatyka zabezpieczeniowa. . . . .	51
2.6.5. Jakość dostawy energii elektrycznej. . . . .	51
2.6.6. Straty mocy i energii . . . . .	52
2.6.7. Praca wyspowa. . . . .	52
2.7. Praktyki stosowane przez OSD . . . . .	54
2.7.1. Regulacje prawne i wymagania stawiane jednostkom wytwórczym przyłączonym do sieci zasilającej. . . . .	54

2.7.2.	Eksploracja i certyfikacja instalacji PV . . . . .	55
2.7.3.	Ograniczenia dotyczące mocy RZE . . . . .	55
2.7.4.	Wzrost mocy przyłączeniowej sieci . . . . .	57
	Literatura . . . . .	61
<b>3.</b>	<b>Rozwój fotowoltaicznych źródeł energii . . . . .</b>	<b>64</b>
	Konstanty MARSZAŁEK	
3.1.	Wprowadzenie . . . . .	64
3.2.	Budowa ogniwa fotowoltaicznego . . . . .	74
3.3.	Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa . . . . .	76
3.4.	Układy fotowoltaiczne na świecie . . . . .	81
3.5.	Układy fotowoltaiczne w Europie . . . . .	85
3.6.	Układy fotowoltaiczne w Polsce . . . . .	89
	Literatura . . . . .	91
<b>4.</b>	<b>Systemy monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej . . . . .</b>	<b>93</b>
	Andrzej FIRLIT	
4.1.	Wprowadzenie . . . . .	93
4.2.	Monitorowanie parametrów pracy sieci elektroenergetycznych ze szczególnym uwzględnieniem wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej. . . . .	98
4.3.	Struktura rozproszonego systemu monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej. . . . .	107
4.4.	Analizator jakości energii elektrycznej . . . . .	114
4.5.	Analiza, interpretacja i raportowanie wyników pomiarów jakości dostawy energii elektrycznej. . . . .	125
	4.5.1. Monitorowanie zdarzeń . . . . .	128
	4.5.2. Wybrane aspekty analizy danych pomiarowych. . . . .	130
4.6.	Systemy pomiarowe ciągłego monitorowania wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej. . . . .	143
4.7.	Integracja danych pomiarowych . . . . .	145
	Literatura . . . . .	151
<b>5.</b>	<b>Układy energoelektroniczne w systemach fotowoltaicznych . . . . .</b>	<b>155</b>
	Stanisław PIRÓG	
5.1.	Panele fotowoltaiczne. . . . .	155
5.2.	Wyznaczanie punktu mocy maksymalnej . . . . .	159
5.3.	Sprawność a obciążenie falownika. . . . .	162

5.4.	Ogólne informacje o falownikach dla fotowoltaiki . . . . .	163
5.5.	Przekształtniki DC/DC . . . . .	167
5.5.1.	Przekształtnik podwyższający napięcie stałe ( <i>boost converter</i> ). . . . .	167
5.5.2.	Przekształtnik do obniżania i podwyższania napięcia ( <i>buck-boost converter</i> ) . . . . .	169
5.5.3.	Impulsowy przekształtnik półmostkowy . . . . .	170
5.5.4.	Przekształtnik typu flyback . . . . .	172
5.5.5.	Mostkowy przekształtnik z przesunięciem fazowym (Full Bridge Phase-Shift DC/DC Converter) . . . . .	175
5.6.	Bilans mocy chwilowej obwodu DC i AC falownika . . . . .	175
5.7.	Prąd upływu w instalacji fotowoltaicznej . . . . .	178
5.8.	Beztransformatorowe falowniki jednofazowe . . . . .	179
5.8.1.	Falownik mostkowy H . . . . .	179
5.8.2.	Falownik H5 . . . . .	181
5.8.3.	Falownik HERIC . . . . .	181
5.8.4.	Jednofazowy falownik trójpoziomowy NPC . . . . .	182
5.8.5.	Przekształtnik Karschny . . . . .	184
5.8.6.	Jednofazowe falowniki kaskadowe . . . . .	185
5.9.	Falowniki trójfazowe . . . . .	187
5.9.1.	Trójfazowy falownik dwupoziomowy . . . . .	187
5.9.2.	Trójfazowy falownik trójpoziomowy NPC . . . . .	188
5.10.	Układ regulacji trójfazowego falownika sieciowego . . . . .	189
5.10.1.	Regulacja składowych prądów falownika trójfazowego. . . . .	189
5.10.2.	Regulacja składowych prąd falownika jednofazowego . . . . .	196
5.10.3.	Regulacja napięcia w punkcie przyłączenia instalacji fotowoltaicznej . . . . .	200
	Literatura . . . . .	203
	Literatura uzupełniająca . . . . .	205
<b>6.</b>	<b>Wpływ instalacji fotowoltaicznych na jakość dostawy energii elektrycznej . . . . .</b>	<b>207</b>
	Andrzej FIRLIT, Zbigniew HANZELKA, Krzysztof PIĄTEK, Łukasz TOPOLSKI	
6.1.	Wartość skuteczna napięcia . . . . .	207
6.1.1.	Zmiana napięcia . . . . .	209
6.1.2.	Przykładowe wyniki pomiarów . . . . .	217
6.2.	Asymetria napięcia . . . . .	227
6.2.1.	Przykładowe wyniki pomiarów . . . . .	231
6.2.2.	Metody rozliczania prosumentów w warunkach niesymetrii . . . . .	235
6.3.	Szybkie zmiany napięcia . . . . .	237
6.4.	Wahania napięcia . . . . .	244
6.5.	Odkształcenie napięcia . . . . .	255



6.5.1.	Wpływ odkształcenia napięcia zasilającego . . . . .	258
6.5.2.	Wpływ generowanej mocy . . . . .	259
6.5.3.	Wpływ impedancji źródła zasilania . . . . .	260
6.5.4.	Wpływ wartości napięcia . . . . .	261
6.5.5.	Wzmocnienia harmonicznych . . . . .	261
6.5.6.	Przykładowe wyniki pomiarów . . . . .	265
6.5.7.	Sumowanie harmonicznych wielu rozproszonych instalacji PV . . . . .	269
6.5.8.	Wartości graniczne emisji harmonicznych . . . . .	270
6.6.	Supraharmoniczne . . . . .	273
6.6.1.	Przykładowe wyniki pomiarów . . . . .	275
6.6.2.	Poziomy graniczne supraharmonicznych . . . . .	283
6.6.3.	Emisja połowa . . . . .	286
6.7.	Sposoby ograniczenia wzrostu napięcia . . . . .	286
6.7.1.	Zwiększenie lokalnej autokonsumpcji energii . . . . .	288
6.7.2.	Transformatory z przełącznikami zaczepów pod obciążeniem . . . . .	289
6.7.3.	Transformatory „energoelektroniczne” . . . . .	295
6.7.4.	Transformatory hybrydowe . . . . .	295
6.7.5.	Szeregowe stabilizatory napięcia. . . . .	297
6.7.6.	Równoległe stabilizatory, kompensatory mocy biernej . . . . .	306
6.7.7.	Zasilanie falowników PV przez transformatory obniżające napięcie . . . . .	311
6.7.8.	Konfigurowanie intencjonalnej pracy wyspowej . . . . .	314
6.7.9.	Falowniki PV typu smart. . . . .	316
6.7.10.	Sposoby redukcji asymetrii napięć i prądów. . . . .	331
6.7.11.	Magazyny energii elektrycznej . . . . .	334
	Literatura . . . . .	339
<b>7.</b>	<b>Warunki techniczne przyłączenia instalacji PV do sieci elektroenergetycznej. . . . .</b>	<b>353</b>
	Paweł BALAWENDER, Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Zbigniew HANZELKA, Łukasz TOPOLSKI, Tomasz SIOSTRZONEK	
7.1.	Koncepcja zdolności przyłączeniowej sieci . . . . .	353
7.1.1.	Zdolność przyłączeniowa sieci ze względu na odkształcenie napięcia . . . . .	354
7.1.2.	Metody szacowania ZP. . . . .	357
7.2.	Praktyki stosowane przez OSD . . . . .	360
7.3.	Podział instalacji fotowoltaicznych . . . . .	362
7.4.	Procedura przyłączania mikroinstalacji PV do sieci zasilającej. . . . .	365
7.4.1.	Załączanie i wyłączanie instalacji . . . . .	368
7.4.2.	Liczba faz układu. . . . .	368
7.4.3.	Układy zabezpieczeń. . . . .	368
7.5.	Instalacje fotowoltaiczne typu A . . . . .	373

7.6. Tryby pracy (strategie sterowania) falowników mikroinstalacji fotowoltaicznych wpływające na poprawę ich współpracy z siecią zasilającą . . . . .	376
7.6.1. Wymagania w zakresie regulacji mocy biernej w odpowiedzi na zmiany napięcia . . . . .	376
7.6.2. Wymagania w zakresie regulacji mocy czynnej w odpowiedzi na zmiany napięcia . . . . .	385
7.6.3. Wymagania w zakresie reakcji falownika na zmiany częstotliwości napięcia . . . . .	388
7.6.4. Zalecenia w zakresie trybów UVRT oraz OVRT . . . . .	393
7.6.5. Podsumowanie badań wybranych falowników PV . . . . .	406
7.7. Sprawność falownika. . . . .	408
7.7.1. Badanie sprawności konwersji oraz statycznej sprawności MPPT. . . . .	410
7.7.2. Dynamiczna sprawność MPPT . . . . .	413
7.8. Przepięcia w instalacja fotowoltaicznych . . . . .	415
7.8.1. Przepięcia wewnętrzne i sposoby zabezpieczeń . . . . .	419
7.8.2. Przepięcia komutacyjne . . . . .	419
7.8.3. Przepięcia zewnętrzne i sposoby zabezpieczeń . . . . .	420
7.8.4. Koordynacja zabezpieczeń . . . . .	424
7.9. Regulacje prawne i wymagania stawiane modułom klasy B . . . . .	424
7.10. Wzrost zdolności przyłączeniowej sieci . . . . .	427
Literatura podstawowa . . . . .	429
<b>8. Prognozowanie generacji energii elektrowni fotowoltaicznych . . . . .</b>	<b>435</b>
Mateusz DUTKA, Zbigniew HANZELKA	
8.1. Wprowadzenie . . . . .	435
8.2. Opis obiektu . . . . .	436
8.3. Źródła danych . . . . .	436
8.4. Wpływ czynników zewnętrznych na pracę elektrowni fotowoltaicznej. . . . .	439
8.5. Strumienie danych meteorologicznych na potrzeby prognozowania . . . . .	443
8.6. Poszukiwanie wzorców. . . . .	447
8.6.1. Algorytm grupowania k-średnich . . . . .	448
8.6.2. Algorytm hierarchiczny grupowania . . . . .	450
8.7. Prognozowanie przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji . . . . .	452
8.7.1. Mierniki jakości modeli prognostycznych. . . . .	452
8.7.2. Sieci MultiLayer Perceptron (MLP) . . . . .	453
8.8. Sieci radialne . . . . .	456
8.9. Sieci rekurencyjne . . . . .	458
8.10. Maszyny wektorów nośnych . . . . .	459
8.11. Porównanie . . . . .	460
Literatura . . . . .	461

<b>ZAŁĄCZNIK A. Elektrownie fotowoltaiczne w ankietach</b>	480
A.1. Opinie koordynatorów klastrów energii, operatorów sieciowych i instytucji wspierających rozwój energetyki rozproszonej w Polsce	463
A.1.1. Informacje techniczne o źródłach energii przyłączonych do sieci dystrybucyjnej	465
A.1.2. Procedura przyłączania rozproszonych źródeł energii do sieci dystrybucyjnej	469
A.1.3. Współpraca RZE z siecią zasilającą	472
A.2. Ankieta CIGRE	475
A.3. Bariery rozwoju instalacji PV w budynkach niekomunalnych w Szwecji	476
Literatura	478
<b>ZAŁĄCZNIK B. Poradnik w zakresie inwestycji w instalacje fotowoltaiczne</b>	480
B.1. Wstęp	480
B.2. Podział instalacji fotowoltaicznych	480
B.3. Powierzchnia wymagana pod budowę instalacji fotowoltaicznej	481
B.4. Uwarunkowania formalnoprawne	482
B.5. Lokalizacja	484
B.6. Ochrona środowiska	490
B.7. Warunki przyłączenia do sieci dystrybucyjnej/przesyłowej	493
B.7.1. Procedura przyłączenia mikroinstalacji o mocy zainstalowanej mniejszej od mocy przyłączeniowej	494
B.7.2. Procedura przyłączenia mikroinstalacji o mocy zainstalowanej większej od mocy przyłączeniowej	494
B.7.3. Procedura przyłączenia małej instalacji OZE oraz instalacji o mocy zainstalowanej większej niż 500 kW	495
B.8. Proces budowlany	496
Literatura	498
<b>ZAŁĄCZNIK C. Przykładowy program funkcjonalno-użytkowy instalacji fotowoltaicznej o mocy 500 kWp</b>	500
C.1. Część opisowa	501
C.1.1. Opis ogólny przedmiotu zamówienia	501
C.1.2. Opis wymagań	502
C.2. Część informacyjna programu funkcjonalno-użytkowego	514
C.2.1. Dokumenty potwierdzające zgodność zamierzenia budowlanego z wymaganiami wynikającymi z odrębnych przepisów	514
C.2.2. Oświadczenie zamawiającego stwierdzające jego prawo do dysponowania nieruchomością na cele budowlane	514
C.2.3. Wykaz załączników	514
Literatura	514

---

<b>ZAŁĄCZNIK D. Klaster Energii „Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica” . . .</b>	<b>517</b>
Literatura . . . . .	527
<b>ZAŁĄCZNIK E. Badania falowników fotowoltaicznych . . . . .</b>	<b>528</b>
Literatura . . . . .	531
<b>ZAŁĄCZNIK F. Kryteria przyłączenia RZE do sieci zasilającej . . . . .</b>	<b>533</b>
Literatura . . . . .	557