

**Instalacje fotowoltaiczne w systemie elektroenergetycznym : jakość dostaw energii elektrycznej, warunki techniczne przyłączenia instalacji PV / redakcja naukowa Zbigniew Hanzelka, Krzysztof Piątek. – Wydanie I. – Warszawa, 2024**

Spis treści

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Rozwój rozproszonych źródeł energii</b>                                                        | <b>15</b> |
| <i>Łukasz TOPOLSKI</i>                                                                               |           |
| 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> |
| <i>Zbigniew HANZELKA</i>                                                                             |           |
| 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. Przeciążenia 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. Eksploatacja 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. Rozwój fotowoltaicznych źródeł energii</b>                                                     | <b>64</b> |
| <i>Konstanty MARSZAŁEK</i>                                                                           |           |
| 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. Systemy monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej</b>                                                                          | <b>93</b>      |
| <i>Andrzej FIRLIT</i>                                                                                                                         |                |
| 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            |
| <br><b>5. Układy energoelektroniczne w systemach fotowoltaicznych</b>                                                                         | <br><b>155</b> |
| <i>Stanisław PIRÓG</i>                                                                                                                        |                |
| 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 |

## **6. Wpływ instalacji fotowoltaicznych na jakość dostawy energii elektrycznej** **207**

*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. Odształcenie napięcia                                              | 255 |
| 6.5.1. Wpływ odształcenia 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 harmoniczných                                        | 261 |
| 6.5.6. Przykładowe wyniki pomiarów                                      | 265 |
| 6.5.7. Sumowanie harmoniczných wielu rozproszonych instalacji PV        | 269 |
| 6.5.8. Wartości graniczne emisji harmoniczných                          | 270 |
| 6.6. Supraharmoniczne                                                   | 273 |
| 6.6.1. Przykładowe wyniki pomiarów                                      | 275 |
| 6.6.2. Poziomy graniczne supraharmoniczných                             | 283 |
| 6.6.3. Emisja polowa                                                    | 286 |
| 6.7. Sposoby ograniczenia wzrostu napięcia                              | 286 |
| 6.7.1. Zwiększenie lokalnej autokonsumpcji energii                      | 288 |
| 6.7.2. Transformatory z przełącznikami zaczeów 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 |

## **7. Warunki techniczne przyłączenia instalacji PV do sieci elektroenergetycznej** **353**

*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 odształcenie |     |

|                                                                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 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 instalacji 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> |
| <i>Mateusz DUTKA, Zbigniew HANZELKA</i>                                                                                                      |            |
| 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>                                                                           | <b>480</b> |
| 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>                                                       | <b>480</b> |
| 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>                              | <b>500</b> |
| 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        |

oprac. BPK