

Spis treści

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Od autorów</b>                                    | <b>11</b> |
| <b>Podziękowania</b>                                 | <b>12</b> |
| <b>Wprowadzenie. Dokąd zmierzamy?</b>                | <b>13</b> |
| <b>A. ASPEKTY TECHNICZNE</b>                         | <b>17</b> |
| <b>1. Wytwarzanie energii elektrycznej</b>           | <b>18</b> |
| 1.1. Konwencjonalne źródła energii                   | 20        |
| 1.1.1. Węgiel brunatny i kamienny                    | 20        |
| 1.1.2. Gaz ziemny                                    | 24        |
| 1.1.3. Elektrownie jądrowe                           | 26        |
| 1.1.4. Małe reaktory modułowe                        | 29        |
| 1.2. Odnawialne źródła energii                       | 31        |
| 1.2.1. Biomasa i biogaz                              | 31        |
| 1.2.2. Elektrownie wodne                             | 32        |
| 1.2.3. Elektrownie słoneczne                         | 34        |
| 1.2.4. Elektrownie wiatrowe                          | 35        |
| 1.3. Wykorzystanie wodoru                            | 36        |
| 1.4. Najlepsze źródło energii                        | 40        |
| <b>2. Bezpieczeństwo energetyczne</b>                | <b>41</b> |
| 2.1. Energia elektryczna jako towar                  | 41        |
| 2.2. Konieczność ciągłych dostaw                     | 42        |
| 2.3. Jakość i niezawodność energii elektrycznej      | 42        |
| 2.4. Sektor elektroenergetyczny w Europie            | 43        |
| 2.5. Sektor elektroenergetyczny w Polsce             | 44        |
| 2.5.1. Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną | 44        |
| 2.5.2. Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce     | 46        |
| 2.6. Rola odnawialnych źródeł energii                | 47        |
| 2.7. Bezpieczeństwo energetyczne                     | 49        |
| 2.8. Dyspozycyjność i sterowalność                   | 50        |
| 2.9. Ciągłość zasilania i adekwatność                | 51        |
| 2.10. Bilanse mocy i energii elektrycznej            | 52        |
| 2.10.1. Bilans mocy                                  | 52        |
| 2.10.2. Bilans energii elektrycznej                  | 54        |
| 2.11. Samobilansowanie się źródeł odnawialnych       | 55        |
| 2.12. OZE w transformacji energetycznej              | 56        |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.13. Wymuszone wyłączenia OZE                                | 57        |
| 2.14. Nieefektywne wykorzystanie źródeł odnawialnych          | 60        |
| 2.15. Kiedy przychodzi flauta                                 | 61        |
| 2.16. Magazynowanie energii z OZE                             | 63        |
| 2.17. Możliwe braki energii elektrycznej                      | 64        |
| 2.18. Prognozy dla polskiego systemu elektroenergetycznego    | 65        |
| 2.19. Braki energii i stopnie zasilania                       | 68        |
| 2.20. Możliwy udział OZE w produkcji energii elektrycznej     | 70        |
| 2.20.1. Przykłady godzinowych profili mocy                    | 71        |
| 2.20.2. Założenia prowadzonych analiz                         | 73        |
| 2.20.3. Wypełnianie celów OZE                                 | 74        |
| 2.20.4. Wymagane moce źródeł odnawialnych                     | 75        |
| 2.20.5. Konieczne inwestycje                                  | 76        |
| 2.20.6. OZE w bilansowaniu zapotrzebowania na energię         | 77        |
| 2.20.7. Magazynowanie energii odnawialnej                     | 78        |
| <b>3. Przesyłanie energii elektrycznej</b>                    | <b>80</b> |
| 3.1. Systemy przesyłowe                                       | 80        |
| 3.1.1. Sterowania przepływami energii elektrycznej            | 82        |
| 3.1.2. Praca linii w stanach normalnych                       | 83        |
| 3.1.3. Wpływ generacji rozproszonej na system przesyłowy      | 84        |
| 3.2. Systemy dystrybucyjne                                    | 86        |
| 3.2.1. Schematy zastępcze linii niskiego i średniego napięcia | 86        |
| 3.2.2. Straty napięcia, mocy i energii                        | 87        |
| 3.3. Oddziaływanie OZE na rozpływy energii                    | 88        |
| 3.3.1. Wojny prosumenckich falowników                         | 88        |
| 3.3.2. Nowe warunki pracy sieci dystrybucyjnej                | 89        |
| 3.3.3. Przyłączanie nowych źródeł                             | 92        |
| 3.3.4. Zasady przyłączania źródeł energii elektrycznej        | 93        |
| 3.3.5. Moce przyłączeniowe w systemie przesyłowym             | 93        |
| 3.3.6. Moce przyłączeniowe w systemach dystrybucyjnych        | 94        |
| 3.3.7. Odmowy przyłączy                                       | 95        |
| 3.3.8. Przyłączanie prosumentów                               | 96        |
| 3.3.9. Możliwości działania operatorów sieci                  | 97        |
| 3.4. Jakość i niezawodność energii elektrycznej               | 98        |
| 3.4.1. Kategorie odbiorników                                  | 99        |
| 3.4.2. Wpływ jakości energii na odbiorców                     | 99        |
| 3.5. Linie prądu stałego                                      | 101       |
| 3.6. Elektryczne sprzęgła back-to-back                        | 103       |
| 3.7. Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne          | 104       |
| 3.8. Linie bezpośrednie                                       | 105       |
| 3.9. Klastry energii                                          | 106       |
| 3.10. Energetyka rozproszona w systemie elektroenergetycznym  | 109       |
| 3.11. Połączenie z sąsiednimi systemami                       | 111       |
| 3.12. Przepływy kołowe                                        | 113       |

|                                                             |                |
|-------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>4. Magazyny energii</b>                                  | <b>114</b>     |
| 4.1. Kategorie magazynów energii                            | 115            |
| 4.2. Magazyny wodorowe                                      | 116            |
| 4.3. Przyszłość magazynów energii                           | 117            |
| 4.4. Wykorzystanie magazynów energii                        | 117            |
| 4.5. Magazyny energii w systemie przesyłowym                | 119            |
| 4.6. Magazyny energii w systemie dystrybucyjnym             | 124            |
| 4.6.1. Magazyny energii przy farmach wiatrowych             | 124            |
| 4.6.2. Magazyny energii w przemyśle                         | 125            |
| 4.7. Prosumenckie magazyny energii                          | 126            |
| <br><b>B. ASPEKTY EKONOMICZNE</b>                           | <br><b>133</b> |
| <br><b>5. Koszt energii elektrycznej</b>                    | <br><b>134</b> |
| 5.1. Taryfowanie energii elektrycznej                       | 134            |
| 5.2. Składniki opłat za energię elektryczną                 | 136            |
| 5.2.1. Koszty produkcji energii elektrycznej                | 136            |
| 5.2.2. Opłaty przesyłowe                                    | 137            |
| 5.3. Składowe kosztów wytwarzania energii elektrycznej      | 138            |
| 5.3.1. Koszty stałe                                         | 139            |
| 5.3.2. Wpływ czasu pracy na koszty energii elektrycznej     | 141            |
| 5.3.3. Koszty operacyjne w elektrowniach konwencjonalnych   | 142            |
| 5.3.4. Koszty energii jądrowej                              | 146            |
| 5.3.5. Koszt odnawialnych źródeł energii                    | 146            |
| 5.3.6. Koszty magazynów energii                             | 148            |
| 5.4. Koszty przesyłania energii elektrycznej                | 152            |
| 5.4.1. Składniki G i L w taryfach                           | 152            |
| 5.4.2. Struktura kosztów przesyłania energii elektrycznej   | 153            |
| 5.4.3. Zniekształcenie stawek przesyłowych                  | 153            |
| 5.4.4. Opłata przejściowa                                   | 154            |
| 5.5. Odnawialne źródła energii                              | 155            |
| 5.5.1. Zielone certyfikaty                                  | 155            |
| 5.5.2. System taryfowy dla źródeł odnawialnych - aukcje OZE | 157            |
| 5.5.3. Inne subsydia                                        | 159            |
| 5.6. Rynki mocy                                             | 160            |
| 5.7. Podatki i akcyza                                       | 163            |
| 5.7.1. Podatek VAT                                          | 163            |
| 5.7.2. Akcyza na energię elektryczną                        | 164            |
| 5.8. Koszty zakupu pozwoleń na emisję dwutlenku węgla       | 165            |
| 5.9. Wartość rynkowa energii z OZE                          | 168            |
| 5.10. OZE na Rynku Dnia Następnego                          | 172            |
| 5.11. Błędy prognoz OZE                                     | 174            |
| 5.12. Koszty rezerw mocy                                    | 175            |
| 5.13. Rezerwy mocy dla OZE                                  | 177            |
| 5.13.1. Kontraktowanie rezerw mocy                          | 177            |

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.13.2. Płatności za kontrakty mocy                              | 178        |
| 5.13.3. Działanie OZE z kontraktami na rezerwy mocy              | 179        |
| <b>6. Rynki energii elektrycznej</b>                             | <b>182</b> |
| 6.1. Rynek hurtowy                                               | 183        |
| 6.2. Rynek detaliczny                                            | 184        |
| 6.3. Zasięg rynków                                               | 184        |
| 6.4. Reakcje rynków na zmienność podaży i popytu                 | 185        |
| 6.4.1. Ceny gazu ziemnego w Europie                              | 185        |
| 6.4.2. Ceny węgla kamiennego w Europie                           | 186        |
| 6.4.3. Ceny energii elektrycznej w Polsce                        | 188        |
| 6.5. Główne struktury rynków energii elektrycznej                | 190        |
| 6.5.1. Rynek energii elektrycznej typu <i>pool</i>               | 190        |
| 6.5.2. Rynek bilateralny                                         | 192        |
| 6.6. Zasady handlu energią elektryczną                           | 192        |
| 6.6.1. Miedziana płyta                                           | 192        |
| 6.6.2. Cechy energii jako towaru                                 | 193        |
| 6.6.3. Rynki tylko energii                                       | 195        |
| 6.6.4. Cena krańcowa czy cena ofertowa?                          | 196        |
| 6.7. Giełdy energii                                              | 197        |
| 6.7.1. Rynki dnia następnego i bieżącego                         | 198        |
| 6.7.2. Rynki kontraktowe                                         | 199        |
| 6.7.3. Kontrakty hedgingowe                                      | 200        |
| 6.7.4. Obligo giełdowe                                           | 202        |
| 6.7.5. Mechanizm tworzenia się wysokich cen                      | 202        |
| 6.8. Rynki bilansujące                                           | 203        |
| 6.8.1. Zasady działania rynku bilansującego                      | 203        |
| 6.8.2. Struktura rynku bilansującego                             | 205        |
| 6.8.3. Bilansowanie handlowe                                     | 206        |
| 6.8.4. Oferty bilansujące                                        | 208        |
| 6.8.5. Równoważenie rzeczywistego zapotrzebowania z produkcją    | 210        |
| 6.8.6. Ograniczenia w przesyłaniu i ich usuwanie                 | 211        |
| 6.9. Rynek detaliczny                                            | 212        |
| 6.9.1. Uprzywilejowana pozycja odbiorcy - TPA                    | 212        |
| 6.9.2. Podmiot bilansujący                                       | 213        |
| 6.9.3. Sprzedawca zobowiązany                                    | 214        |
| 6.9.4. Umowy na energię elektryczną                              | 215        |
| <b>7. Koszty funkcjonowania systemu elektroenergetycznego</b>    | <b>217</b> |
| 7.1. Podstawy ekonomicznej efektywności inwestycji               | 217        |
| 7.1.1. Prosty okres zwrotu                                       | 217        |
| 7.1.2. <i>Net Present Value</i> - NPV                            | 218        |
| 7.1.3. Metody zdyskontowane obliczania czasu zwrotu z inwestycji | 218        |
| 7.2. Koszty niedostarczonej energii elektrycznej                 | 221        |
| 7.2.1. Ceny maksymalne i minimalne                               | 221        |
| 7.2.2. Koszty niedostarczonej energii                            | 221        |

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.3. Opłacalność stosowania magazynów energii                                              | 225        |
| 7.3. Koszty transformacji energetycznej                                                      | 227        |
| 7.3.1. Wyniki analiz                                                                         | 228        |
| 7.3.2. Główne składniki kosztów                                                              | 228        |
| 7.3.3. Nakłady skumulowane                                                                   | 229        |
| 7.3.4. Podsumowanie kosztów transformacji energetycznej                                      | 229        |
| <b>C. ASPEKTY SPOŁECZNE, ŚRODOWISKOWE I REGULACYJNE</b>                                      | <b>231</b> |
| <b>8. Energetyka a klimat</b>                                                                | <b>232</b> |
| 8.1. Zmiany klimatu                                                                          | 232        |
| 8.2. Czynniki wpływające na zmianę klimatu                                                   | 234        |
| 8.3. Antropogeniczne źródła emisji                                                           | 236        |
| 8.4. Polityka klimatyczno-energetyczna na świecie                                            | 240        |
| 8.5. Polityka klimatyczno-energetyczna w Unii Europejskiej                                   | 242        |
| 8.6. Normy emisji                                                                            | 244        |
| <b>9. Energetyka a społeczeństwo</b>                                                         | <b>246</b> |
| 9.1. Zatrudnienie w energetyce                                                               | 246        |
| 9.1.1. Zatrudnienie w branży OZE                                                             | 247        |
| 9.1.2. Sprawiedliwa transformacja                                                            | 248        |
| 9.2. Społeczna odpowiedzialność energetyki (CSR i ESG)                                       | 252        |
| 9.3. Wpływ społeczeństwa na energetykę                                                       | 253        |
| 9.4. Niezależność energetyczna państw                                                        | 257        |
| 9.4.1. Zależność od wiedzy i technologii                                                     | 258        |
| 9.4.2. Zależność od paliw                                                                    | 261        |
| 9.4.3. Zależność od importu energii elektrycznej                                             | 265        |
| <b>10. Energetyka a środowisko</b>                                                           | <b>267</b> |
| 10.1. Energetyka konwencjonalna                                                              | 267        |
| 10.2. Energetyka wiatrowa                                                                    | 269        |
| 10.2.1. Rozwój energetyki wiatrowej                                                          | 269        |
| 10.2.2. Protesty i ustawa 10H                                                                | 270        |
| 10.2.3. Hałas farm wiatrowych                                                                | 270        |
| 10.2.4. Stanowisko Narodowego Instytutu Zdrowia Publicznego<br>- Państwowego Zakładu Higieny | 271        |
| 10.2.5. Migotanie cienia                                                                     | 272        |
| 10.2.6. Propozycje regulacji prawnych                                                        | 272        |
| 10.2.7. Wiatraki morskie                                                                     | 273        |
| 10.3. Panele PV                                                                              | 274        |
| 10.4. Biogazownie                                                                            | 274        |
| 10.5. Spalanie biomasy                                                                       | 274        |
| 10.6. Elektrownie wodne                                                                      | 275        |
| 10.7. Energetyka jądrowa                                                                     | 276        |
| 10.7.1. Three Mile Island                                                                    | 276        |
| 10.7.2. Czarnobyl                                                                            | 276        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 10.7.3. Fukushima                 | 277        |
| 10.8. Rekultywacja i recykling    | 277        |
| 10.8.1. Energetyka konwencjonalna | 278        |
| 10.8.2. Energetyka odnawialna     | 280        |
| <b>Podsumowanie</b>               | <b>282</b> |
| <b>Bibliografia</b>               | <b>283</b> |
| <b>Spis rysunków</b>              | <b>291</b> |
| <b>Spis tabel</b>                 | <b>294</b> |

oprac. BPK