

Analiza szeregów czasowych produkcji energii ze źródeł odnawialnych pod kątem niezależności energetycznej wybranego obszaru

Streszczenie. Artykuł opisuje próby zapewnienia zbilansowania mocowego i energetycznego analizowanego obszaru, podczas których przeprowadzono szereg symulacji dotyczących współpracy OZE przy ich różnych liczbach. W symulacjach rozważono dwa scenariusze. W pierwszym z nich dopuszczono możliwość współpracy obszaru z Operatorem Energetyki Zawodowej w celu sprzedaży nadwyżek wytwarzanej energii elektrycznej oraz zakupu jej w godzinach deficytu energetycznego. W drugim całość nadwyżek produkowanej energii była magazynowana w zasobnikach energii i wykorzystywana w godzinach, dla których pobór energii był większy od jej produkcji. Symulowane godzinowe dane o produkcji energii elektrycznej w OZE wyznaczano na podstawie warunków meteorologicznych.

Abstract. This article describes the trials of providing the power and energy balancing of the studied area, during which a series of simulations concerning the cooperation of the RES, employing a different number of these sources, has been performed. Two options have been considered in the simulations. The first one contains the possibility of the cooperation between the studied area and a Commercial Operator in order to sell a surplus of produced electricity as well as its purchase in the hours of energy deficit. In the second option, all of the surplus of the produced power was stored in an energy storage and used during the scarcity of generated power. Simulated, hourly data of RES electric energy generation were determined on basis of meteorological conditions. **The analysis of time series of energy production from renewable sources in terms of the energy independence of the chosen area**

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, zasobniki energii, bilansowanie, parametry meteorologiczne.

Keywords: renewable energy sources, energy storage, balancing, meteorological parameters.

Wstęp

W ciągu ostatnich kilku lat wraz ze wzrostem produkcji energii elektrycznej z OZE, wzrosła także świadomość społeczna związana z ograniczeniami w stosowaniu tych źródeł. Istnieje wiele koncepcji dotyczących energii elektrycznej produkowanej w Odnawialnych Źródłach Energii (OZE). Dotyczą one zarówno samych źródeł (energii pierwotnej), konstrukcji źródeł jak i sposobu końcowego wykorzystania tak wytworzonej energii. Jednym z kluczowych zagadnień jest możliwość zapewnienia niezależności energetycznej. Jest ona rozumiana na wiele sposobów, także podnosi się kwestie czy wykorzystanie energii z OZE zwiększa bezpieczeństwo energetyczne.

W generalnych koncepcjach wykorzystania energii elektrycznej z OZE rozpatruje się dwa przypadki:

- źródeł przyłączonych do krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE),
- źródeł przyłączonych do mikrosystemu elektroenergetycznego pracującego w trybie wyspowym (niepołączonego do KSE).

Dlatego też niezależność energetyczną wybranego obszaru można rozpatrywać w dwojaki sposób.

1. Jako możliwość wygenerowania w pewnym (rozliczeniowym) okresie energii pokrywającej zapotrzebowanie odbiorców obszaru. Ewentualne niezbilansowanie mocowe jest pokrywane z KSE.
2. Jako możliwość pełnego zbilansowania mocowego obszaru. Skutkuje to oczywiście także zbilansowaniem energetycznym w pewnym okresie.

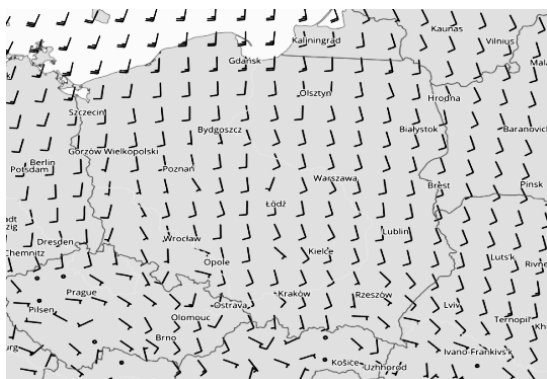
Istotnym elementem w obu przypadkach jest wykorzystanie zasobników energii elektrycznej. Wśród prac dotyczących wykorzystania zasobników energii elektrycznej we współpracy z OZE są prace poświęcone optymalizacji wielkości zasobników na potrzeby współpracy farmy wiatrowej [1] [2] [3] lub źródeł fotowoltaicznych [4] z systemem elektroenergetycznym. Drugim nurtem są prace poświęcone doborowi zasobników energii w mikrosystemach pracujących w trybie wyspowym [5] [6]. Jednak większość prac bazuje na charakterystycznych

przebiegach (np. minutowych, godzinnych, dobowych) produkcji energii elektrycznej lub też na wyznaczonych statystycznych wielkościach (średniowki, minimalne i maksymalne wartości). Brak jest analiz dla długich okresów, dodatkowo wnioski płynące z tych badań nie są reprezentatywne dla polskich warunków.

Dla potrzeb niniejszych badań przeanalizowano prognozy meteorologiczne (dane godzinowe) pochodzące z dwóch niezależnych modeli: UM (Unified Model) brytyjskiej służby Met Office oraz COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System) amerykańskiej marynarki wojennej (US Naval Research Laboratory) operacyjnie uruchamianych w ICM UW (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego). Dane prognostyczne zawierały informacje odnośnie prędkości i kierunku wiatru, nasłonecznienia, temperatury, ciśnienia, opadów i zachmurzenia. Rozdzielczość przestrzenna modelu UM wynosi 4 km, a modelu COAMPS 13 km (odpowiednio długość prognoz dla obu modeli to 72 i 108 godzin). Wykorzystano prognozy wyznaczone dla węzłów siatek znajdujących się najbliżej punktu wybranego do analiz. Wybrane parametry z obu modeli (temperatura powietrza, ciśnienie powietrza zredukowane do poziomu morza, prędkość i kierunek wiatru oraz 12-godzinne sumy opadu) poddawane są weryfikacji dla kilkudziesięciu punktów na terenie Polski. W szczególności, dla prędkości i kierunku wiatru wyznacza się błąd średni ME, błąd średni bezwzględny MAE i pierwiastek z błędu średniokwadratowego RMSE (szczegółowe informacje: <http://weryfikacja.icm.edu.pl>). W przypadku modelu UM wartości błędów średnich prędkości i kierunku wiatru nie przekraczają 0.8 m/s i 14°.

Na terenie Polski występuje duże zróżnicowanie wietrzności (przy średnich wartościach rzędu 3-4 m/s), stąd decyzję odnośnie instalacji turbin wiatrowych zaleca się poprzedzić długoterminową analizą wietrzności na danym obszarze (np. za pomocą globalnego atlasu wietrzności stworzonego we współpracy Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej IRENA we współpracy z Duńskim

Uniwersytetem Technicznym; <http://irena.masdar.ac.ae>) lub pomiarami rzeczywistej prędkości wiatru uwzględniającymi uwarunkowania lokalne (np. ukształtowanie terenu, zabudowę czy roślinność).



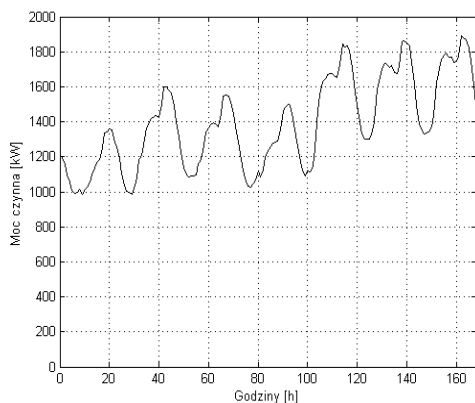
Rys. 1. Prędkość i kierunek wiatru dla obszaru Polski na podstawie prognoz UM dla 21 listopada 2016 godz. 00 UTC (maps.meteo.pl)

Potencjał energetyczny związany z wykorzystaniem nasłonecznienia jest zróżnicowany w ciągu roku: większość rocznego nasłonecznienia w Polsce przypada na okres wiosenno-letni. Średnie roczne sumy usłonecznienia wahają się od 1400 do 1700 godzin [7], a średnie nasłonecznienie wynosi ok. 1000 kWh/m²/rok (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>). Efektywność wykorzystania energii słonecznej zależy od doboru optymalnego odchylenia i skierowania panelu fotowoltaicznego.

W przypadku dużych inwestycji planowanych na uruchomienie OZE warto jest także rozważyć długoterminową zmienność poszczególnych parametrów. Do tego celu można wykorzystać regionalne symulacje klimatyczne umożliwiające wykonanie projekcji klimatycznych w horyzoncie kilkudziesięciu lat (nawet do 2090 roku; <http://klimat.icm.edu.pl>).

Celem pracy było określenie przybliżonej wielkości (rzędu wielkości) źródeł OZE i zasobników energii dla zapewnienia niezależności energetycznej wybranego obszaru w warunkach polskich.

Obszarem tym był fragment aglomeracji o różnorodnej strukturze odbiorców. Występują w nim zarówno odbiorcy komunalno-bytowi, przemysłowi jak i przedsiębiorstwa użyteczności publicznej. Ze względu na brak możliwości pozyskania kompletnego historycznego przebiegu zapotrzebowania (za analizowany okres 6 lat), zdecydowano się na przyjęcie przebiegu zapotrzebowania na moc odpowiadającego kształtem zapotrzebowaniu mocy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Moc szczytowa dla analizowanego obszaru wynosi 1,983 MW.



Rys. 2. Zapotrzebowanie na moc w okresie 01-7.01.2009

Odnawialne źródła energii i magazyny energii

Do określania mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego (PV) wykorzystano zależność matematyczną, łączącą wpływ zarówno parametrów meteorologicznych jak i budowy panelu [8]:

$$(1) \quad P_{out} = P_n \left(1 + (T_{cell} - 25) * \frac{dP}{100} \right) * \frac{G}{1000}$$

gdzie: P_n [W] – moc znamionowa panelu, T_{cell} [°C] – temperatura ogniwa, dP [%/°C] – temperaturowy współczynnik mocy. G [$\frac{W}{m^2}$] – gęstość strumienia promieniowania słonecznego padającego na daną płaszczyznę.

Wyznaczenie wielkości produkcji energii z paneli fotowoltaicznych można opisać jedną zależnością matematyczną, inaczej jest w przypadku turbin wiatrowych. Każda z turbin charakteryzuje się trzema typowymi dla niej wartościami związanymi z prędkością wiatru: prędkością rozruchu turbiny v_{cut-in} , prędkością nominalną v_n oraz prędkością zatrzymania $v_{cut-out}$. Wynikają z nich 4 stany pracy [9]

- Postój w gotowości do pracy – stan pracy występujący przy prędkości wiatru $v < v_{cut-in}$
- Pracą z obciążeniem częściowym – stan pracy występujący przy prędkości wiatru znajdującej się w przedziale $v_{cut-in} < v < v_n$
- Pracą z obciążeniem znamionowym – stan pracy występujący przy prędkości wiatru znajdującej się w przedziale $v_n \leq v < v_{cut-out}$
- Postojem w gotowości do pracy – stan pracy przy zbyt dużej prędkości wiatru $v \geq v_{cut-out}$

Dla stanu pracy z obciążeniem częściowym uzysk energii wyznacza się z zależności [10]:

$$(2) \quad P_{out} = 0,5 * C_p * \rho * A * v^3$$

gdzie: C_p – sprawność wirnika (wartość z zakresu od 0.25 do 0.45) ρ [$\frac{kg}{m^3}$] – gęstość powietrza, A [m²] – przekrój poprzeczny strumienia, v [$\frac{m}{s}$] – prędkość wiatru na wysokości wirnika siłowni wiatrowej.

Przeanalizowano budowę i sposób pracy biogazowni oraz Małych Elektrowni Wodnych. Do dalszych badań wybrano biogazownię wykorzystującą pochodzące z procesu utylizacji osady ściekowe o mocy znamionowej 1090 kW. Ze względu na brak ciekłego wodnego w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanego obszaru, niemożliwe było wykorzystanie elektrowni wodnej.

W celu wybrania najkorzystniejszego magazynu energii dokonano analizy budowy i właściwości następujących zasobników: kinetycznych, pneumatycznych, nadprzewodzących magnetycznych, elektrowni szczytowo-pompowych, ogniw paliwowych, akumulatorów chemicznych oraz superkondensatorów. Po dokładnej analizie ww. rozwiązań zdecydowano się na wykorzystanie akumulatorów kwasowo-ołowiowych jako magazynu energii ze względu na: koszt za jednostkę magazynowanej energii, sprawność dochodzącą do 95% i możliwość przechowywania energii w dłuższych okresach czasu.[11] [12].

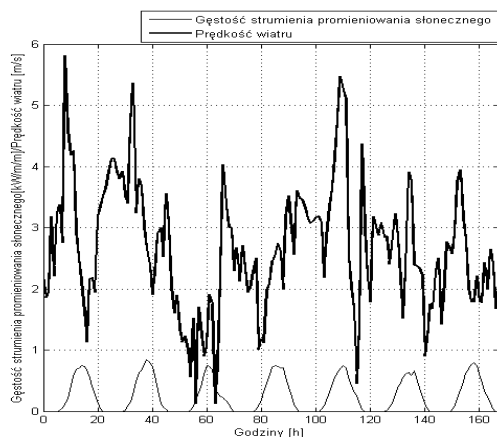
Pierwszą wyznaczoną w procesie symulacji wartością był optymalny kąt odchylenia panelu fotowoltaicznego od płaszczyzny ziemi oraz jego skierowanie względem kierunku południowego dla przyjętych współrzędnych geograficznych analizowanego terenu. Optymalnym ustawieniem pozwalającym na uzyskanie największej ilości energii było odchylenie pod kątem 30° od płaszczyzny ziemi i skierowanie panelu w stronę zachodnią pod kątem 47° od kierunku południowego. Dla tego ustawienia wyznaczono

osiągane przez panele moce dla kolejnych godzin w okresie od roku 2009 do roku 2014 włącznie. W procesie symulacji wykorzystano panele fotowoltaiczne o mocach szczytowych od 195 do 265 W. Dla tego samego przedziału czasu wyznaczono moce osiągnięte w kolejnych godzinach przez turbiny wiatrowe o mocach znamionowych wynoszących od 100 kW do 2 MW. Analiza warunków meteorologicznych wykazała, że najczęściej występującymi prędkościami wiatru na analizowanym terenie są prędkości wynoszące 3 i 4 m/s, czyli prędkości bliskie prędkościom rozruchowym turbin wiatrowych. Przełożyło się to na niewielki stopień wykorzystania mocy tych źródeł, który dla żadnego modelu nie przekroczył 13%.

Po wyznaczeniu wyżej opisanych parametrów i wartości przystąpiono do właściwych symulacji, których celem było wyznaczenie takiej kombinacji liczb i rodzaju odnawialnych źródeł energii, które zapewnią zbilansowanie mocowe i energetyczne analizowanego obszaru. Dodatkowo dla każdego z badanych wariantów przeprowadzono analizę ekonomiczną mającą na celu sprawdzenie jego opłacalności. Przy czym założono, że każde z rozwiązań ma zapewnić ilość energii zużywaną w rozpatrywanym okresie przez analizowany obszar.

Współpraca OZE z siecią elektroenergetyczną

W pierwszej części analiz związanych z zasilaniem obszaru przez OZE sprawdzono czy możliwe jest zapewnienie zbilansowania mocowego obszaru w rozpatrywanym przedziale czasu z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych i jednej biogazowni. W tym celu zweryfikowano występowanie godzin, w których odnotowano brak promieniowania słonecznego oraz prędkości wiatru pozwalającej na produkcję energii (minimalna wartość V_{cut-in} analizowanych turbin wynosiła 2,7 $\frac{m}{s}$) przy zapotrzebowaniu na moc elektryczną obszaru przekraczającą moc znamionową wybranej biogazowni.



Rys. 3. Warunki meteorologiczne panujące w okresie 02-08.07.2012-występowanie godzin o zerowej produkcji energii zarówno z paneli fotowoltaicznych jak i turbin wiatrowych

Analiza danych meteorologicznych potwierdziła występowanie takich godzin, co bezpośrednio przełożyło się na brak możliwości zapewnienia bilansu mocowego obszaru z wykorzystaniem branych pod uwagę OZE. W świetle otrzymanych wyników skupiono się tylko na wyznaczeniu takiej liczby modeli paneli, turbin oraz biogazowni, która zapewni najdokładniejsze zbilansowanie energetyczne obszaru w analizowanym przedziale czasu 6 lat. Takie podejście skutkowało koniecznością dopuszczenia możliwości zakupu energii z sieci w chwilach produkcji własnej niepokrywającej w pełni zapotrzebowanie oraz sprzedaży energii do sieci w chwilach nadmiaru

produkcji. Dodatkowo obliczono, że wartość bieżąca wydatków poniesionych za zakup energii elektrycznej, przy założeniu, że całe zapotrzebowanie analizowanego obszaru pokrywane jest z KSE, wynosi prawie 37 milionów zł. Do analiz wykorzystano następujące warianty współpracy OZE:

- A1 - paneli fotowoltaicznych (PF) o tej samej mocy,
- A2 - paneli fotowoltaicznych o różnych mocach,
- A3 - paneli fotowoltaicznych z biogazownią (B),
- A4 - turbin wiatrowych (TW) o tych samych mocach,
- A5 - turbin wiatrowych o różnych mocach,
- A6 - turbin wiatrowych z biogazownią,
- A7- paneli fotowoltaicznych z turbinami wiatrowymi o najmniejszej wartości DZE
- A8 - paneli fotowoltaicznych z turbinami wiatrowymi przy różnych proporcjach mocy zainstalowanej od PV30/TW70 do PV70/TW30,
- A9 - paneli fotowoltaicznych wraz z turbinami wiatrowymi i biogazownią,
- A10 - paneli fotowoltaicznych wraz z turbinami wiatrowymi (jak w A7) i 2 biogazowniami.

W celu oceny każdego z analizowanych rozwiązań wprowadzono następujące parametry oceny rozwiązania: dokładność zbilansowania energetycznego DZE [kWh] w okresie 6 lat (minus oznacza więcej energii produkowanej niż pobieranej przez odbiorców), zdyskontowana wartość bieżąca DPV [zł] rozpatrywana w okresie 20 lat, najmniejszy bezwzględny średni godzinowy błąd pokrycia zapotrzebowania na energię MAE wyznaczany zgodnie z zależnością:

$$(3) \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_z - E_p|}{n}$$

gdzie: n -liczba godzin w rozpatrywanym okresie 6 lat; E_p [kWh] – energia wytwarzana przez OZE w danej godzinie doby E_z [kWh] – zapotrzebowanie na energię w danej godzinie doby

Przeprowadzone analizy i symulacje związane z wykorzystaniem jedynie paneli fotowoltaicznych wykazały, że stosując różnorodne modele tego typu OZE możliwe jest osiągnięcie bardzo dokładnego zbilansowania energetycznego rzędu kilowatów, dużo większego niż w przypadku paneli o tej samej mocy. Natomiast nie zaobserwowano dużej różnicy we współczynnikach MAE oraz DPV dla tych rozwiązań. Powierzchnia wymaga do poprawnego rozmieszczenia takiej liczby paneli, w przypadku paneli o takiej samej mocy, wynosiłaby ponad 19 ha.

Wykorzystanie do zasilania zarówno paneli fotowoltaicznych jak i biogazowni pozwoliło uzyskać dużo lepsze wyniki branych pod uwagę parametrów, niż miało to miejsce w przypadku pracy samych paneli. Współczynnik MAE udało się poprawić 5 krotnie, a DPV 15 krotnie.

Wykonanie symulacji pracy turbin wiatrowych, zarówno jednakowych modeli jak i kombinacji modeli o różnych mocach, pozwoliło na otrzymanie wartości parametrów oceny rozwiązań zestawionych w Tabeli 2. Wykorzystanie kombinacji turbin wiatrowych o różnej mocy wpłynęło na polepszenie parametrów DZE oraz DPV. Również w tym przypadku wykorzystanie dodatkowo biogazowni jako źródła zasilania spowodowało poprawienie współczynników MAE oraz DPV.

Następnie przeprowadzono symulacje współpracy paneli fotowoltaicznych (PF) wraz z turbinami wiatrowymi (TW) ze sprawdzeniem różnego udziału poszczególnych OZE w całości produkowanej energii. W przypadku wykorzystywania obu tych rodzajów OZE przy poszukiwaniu wartości DZE najbliższej zeru osiągnięto również najlepszą wartość MAE , co pociągnę za sobą

największe nakłady finansowe. Analiza współpracy paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych oraz biogazowni wykazała, że takie połączenie pozwala na poprawę parametrów MAE oraz DPV przy zachowaniu akceptowalnie niskiego poziomu współczynnika DZE.

Tabela 1. Parametry oceny poszczególnych wariantów

Wariant	Zainstalowana moc OZE [MW]	DZE [kWh]	MAE [kWh]	DPV [miliony zł]
A1	8,4	-195,8	1616,3	-76
A2	8,4	-7,2	1616,7	-79
A3	2,9	2,8	325,5	-5
A4	17,1	-33934,5	1317,2	-108
A5	19,6	-1,2	1533,8	-134
A6	4,9	-5,9	346,6	-14
A7	20,5	-3,4	1316,7	-127
A8-30/70	13	-72,4	1164,7	-94
A8-40/60	13,1	-61,7	1173,1	-98
A8-50/50	12,1	-49,1	1175,9	-90
A8-60/40	11,6	71,3	1222,5	-93
A8-70/30	10,9	-63	1285,9	-89
A9	5,1	-12,494	282,0	-13
A10	22,6	-35185728,9	748,6	-114

Jedyną udaną próbą zbilansowania mocowego oraz energetycznego obszaru była symulacja wykorzystująca zarówno panele fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe jak i dwie biogazownie. Jednak takie rozwiązanie pociąga za sobą ogromne nakłady inwestycyjne na zakup i utrzymanie instalacji oraz duże nadwyżki produkowanej energii. Wariant ten jest rozbudowaną wersją wariantu A7 posiadającą dodatkowe dwie biogazownie. Z tego wynika, przekraczająca inne rozwiązania o kilka rzędów, wielkość parametru DZE. Zbilansowanie energetyczne zapewnione jest już w rozwiązaniu A7, a dodatkowe źródła energii zapewniając zbilansowanie mocowe dostarczają jednocześnie nadwyżek produkowanej z OZE energii w ujęciu bilansu 6 letnim. Sprzedaż tych nadwyżek energii spowodowała, że rozwiązanie rozbudowane w stosunku do wariantu A7 okazało się być od niego tańsze.

Otrzymana, w każdym z rozpatrywanych przypadków ujemna wartość DPV oznacza, iż w analizowanym okresie nie nastąpił zwrot nakładów poniesionych na inwestycje.

Współpraca OZE z zasobnikami energii

Punktem wyjściowym do dalszych analiz było założenie możliwości i zasadności magazynowania całych nadwyżek energii wyprodukowanej przez OZE, tak by mogła ona zostać wykorzystana w godzinach deficytu produkcji. Podstawę do wykonania symulacji stanowiły opracowane we wcześniejszej części rozwiązania, w których dopuszczono współpracę z zewnętrzną siecią elektroenergetyczną. Przyjęto, że odbiorcy znajdujący się w analizowanym obszarze są całkowicie niezależni od współpracy z krajowym SSE. Analizy dokonano dla 13 przypadków opartych na współpracy:

- B1 - różnych modeli paneli fotowoltaicznych, ich liczba i modele jak w wariacie A2
- B2 - różnych modeli paneli fotowoltaicznych z biogazownią, ich liczba i modele jak w wariacie A3
- B3 - różnych modeli turbin wiatrowych, ich liczba i modele jak w wariacie A5
- B4 - różnych modeli turbin wiatrowych z biogazownią, ich liczba i modele jak w wariacie A6

B5 - różnych paneli fotowoltaicznych z turbinami wiatrowymi o najmniejszej wartości DZE, ich liczba i modele jak w wariacie A7

B6 - paneli fotowoltaicznych z turbinami wiatrowymi przy różnych proporcjach mocy zainstalowanej od PV30/TW70 do 70/30, ich liczba i modele jak w wariantach A8

B7 - paneli fotowoltaicznych z turbinami wiatrowymi i biogazownią, ich liczba i modele jak w wariacie A9

B8 - paneli fotowoltaicznych wraz z turbinami wiatrowymi i 2 biogazowniami, ich liczba i modele jak w wariacie A10.

We wszystkich analizowanych przypadkach magazyny energii, aby spełniać swoje zadanie, musiały posiadać pojemności przekraczające 1 GWh. Wykorzystanie ich wiąże się z ogromnymi kosztami jakie należałoby ponieść w związku z taką inwestycją. Pojemność zasobników energii została określona zarówno w MWh jak i w liczbie dni, w ciągu których obszar mógłby być zasilany jedynie energią zgromadzoną w zasobniku.

Symulacje wykazały, że najlepsze rozwiązania, cechujące się najmniejszymi pojemnościami magazynów, otrzymano dla współpracy odpowiednio dla paneli fotowoltaicznych współpracujących z biogazownią; paneli i turbin współpracujących z biogazownią; turbin współpracujących z biogazownią. Największa pojemności zasobnika energii wymagana była dla rozwiązania B8. Rozwiązanie to, co zostało opisane dokładnie przy opisie wariantu A10, charakteryzuje się dużą nadprodukcją energii z OZE. W rozwiązaniu A10 takie podejście przyniosło korzyść wynikającą ze zwiększenia przychodu ze sprzedaży energii, natomiast w rozwiązaniu B8, gdzie wszystkie nadwyżki trafiają do zasobników wpłynęło na zwiększenie zarówno ich pojemności jak i kosztu całości inwestycji. Rozbudowa rozwiązania A7 do wariantu A10 miała na celu zapewnienie zbilansowania mocowego, które w wariantach B zapewnione jest poprzez odpowiednio dobrany zasobnik, więc nie znajduje zastosowania.

Analiza pojemności zasobników energii np. w wariantach B6 wskazuje na zmniejszanie się pojemności zasobników energii wraz ze wzrostem udziału energii wytwarzanej przez panele fotowoltaiczne i spadkiem udziału energii pochodzącej z turbin wiatrowych. Związane jest to z charakterystykami zmienności gęstości promieniowania słonecznego związanej z energią produkowaną przez panele fotowoltaiczne oraz prędkości wiatru przekładającej się na energię produkowaną przez turbiny wiatrowe. Występujące regularnie w cyklu dobowym godziny produkcji energii elektrycznej i braku produkcji z paneli fotowoltaicznych powodują następujące po sobie doładowania i rozładowania zasobnika energii. Produkcja energii przez turbiny wiatrowe nie charakteryzuje się regularną zmiennością, mogą występować długie przedziały czasu, w których zasobniki są jedynie doładowywane nadwyżkami energii, a nie ma konieczności ich rozładowywania. Wpływa to na budowę zasobników o znacznie większych pojemnościach, w porównaniu z zasobnikami współpracującymi z panelami fotowoltaicznymi, które są przystosowane do przyjęcia całych nadwyżek energii w okresach bardzo wietrznych.

Ze względu na ogromne wartości otrzymanych pojemności magazynów, przy przyjętych założeniach, zdecydowano się na ich zmianę. Wykonano symulację podczas której poszukiwana była minimalna pojemność magazynów zapewniająca zbilansowanie mocowe analizowanego obszaru. Podstawą symulacji było założenie, że do magazynów trafiało tylko tyle energii ile było niezbędne do zapewnienia zbilansowania energetycznego i mocowego. Panele fotowoltaiczne oraz turbiny wiatrowe zostały tak wysterowane aby uniknąć

nadwyżek produkcji energii. W tym scenariuszu wykorzystano te same modele OZE, które były analizowane w wariantcie współpracy OZE A7, ale ich liczba została zwielokrotniona 1,5 raza.

Tabela 2. Wielkości magazynów dla poszczególnych wariantów

Wariant	Pojemność zasobnika energii [MWh]	Pojemność zasobnika energii [dni]	DPV [miliony zł]
B1	4060,8	122	-6945
B2	1263,6	38	-2142
B3	10841	327	-18482
B4	2006,4	60	-34100
B5	8766,9	264	-14964
B6-30/70	6382,5	192	-10895
B6-40/60	5440,4	164	-9303
B6-50/50	4305	130	-7373
B6-60/40	3618,2	109	-6211
B6-70/30	3467,1	104	-5952
B7	1349	41	-2296
B8	56572,8	1708	-95969

Rozwiązanie to związane było z koniecznością zwiększenia liczby modeli paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych, w porównaniu z analogiczną symulacją przy założeniu akumulowania całości nadwyżek energii. Pozwoliło to na zmniejszenie wielkości zasobnika do 227,2 MWh, co pozwoliłoby na zaspokojenie średnich potrzeb energetycznych wybranego obszaru, zasilanych jedynie z zasobników, przez okres prawie pełnych 7 dni. Wadą takiego rozwiązania było występowanie godzin, w których potencjał jednostek wytwórczych nie był w pełni wykorzystywany.

Wnioski

Analiza konstrukcji odnawialnych źródeł energii pozwoliła na określenie i zrozumienie wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz warunków meteorologicznych na wielkość osiąganą przez nie mocy. Na podstawie zależności wiążącej moc paneli fotowoltaicznych z warunkami meteorologicznymi określono optymalne położenie tych jednostek wytwórczych względem powierzchni ziemi oraz kierunku południowego.

Symulacje pracy analizowanych paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych oraz biogazowni w różnych konfiguracjach potwierdziły możliwość zapewnienia bilansu energetycznego analizowanego obszaru w okresie 6 lat, ale bez możliwości uzyskania zbilansowania mocowego. W konsekwencji, dla wszystkich kombinacji współpracy OZE, nadwyżki produkowanej energii były sprzedawane do sieci elektroenergetycznej, a w chwilach deficytu produkcji energii z OZE były one uzupełniane zakupem z sieci. Jedynym wyjątkiem stanowił wariant współpracy turbin wiatrowych, paneli fotowoltaicznych oraz dwóch biogazowni o mocy szczytowej 1090 każda, który zapewnił zarówno zbilansowanie mocowe jak i energetyczne analizowanego obszaru. Dla większości analizowanych przypadków inwestycja w tego rodzaju system zasilania, tj. łączący produkcję z OZE i współpracę z SEE, była nieuzasadniona pod względem koniecznych do poniesienia nakładów finansowych przekraczających znacznie koszt zasilania obszaru jedynie energią zakupioną od wytwórcy zawodowego.

Symulacje współpracy OZE z magazynami energii pokazały, że chęć magazynowania całości nadwyżek

produkowanej energii wiąże się z koniecznością wybudowania ogromnych, niepraktycznych zasobników o pojemnościach liczonych w GWh. Bardziej praktycznym i możliwym do wykonania rozwiązaniem jest przewymiarowanie liczby modeli OZE i magazynowanie jedynie niezbędnego minimum energii potrzebnego do zapewnienia bilansu mocowego i energetycznego obszaru. Rozwiązanie to wiąże się jednak z okresową koniecznością zmniejszania mocy wyjściowych tych jednostek wytwórczych, tj. niewykorzystywaniem ich pełnych zdolności wytwórczych.

Autorzy: mgr inż. Michał Sabat,
PSE Innowacje Sp. z o.o., ul. Aleje Jerozolimskie 132, 02-390,
Warszawa, E-mail: mjsabat@wp.pl;
Dr hab. inż. Dariusz Baczyński,
Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki; ul.
Koszykowa 75 / Gmach Mechaniki pok. 5,
00-662, Warszawa, E-mail: dariusz.baczynski@ien.pw.edu.pl;
Dr inż. Karolina Szafranek,
Uniwersytet Warszawski, Interdyscyplinarne Centrum Modelowania
Matematycznego i Komputerowego; ul. Prosta 69, 00-838
Warszawa; E-mail: k.szafranek@icm.edu.pl

LITERATURA

- [1] Wei Wang *, Chengxiong Mao, Jiming Lu, Dan Wang, An Energy Storage System Sizing Method for Wind Power Integration, *Energies* 2013, 6, 3392-3404;
- [2] X. Y. Wang, D. Mahinda Vilathgamuwa and S. S. Choi, "Determination of Battery Storage Capacity in Energy Buffer for Wind Farm," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 868-878, Sept. 2008.
- [3] Q. Li, S. S. Choi, Y. Yuan and D. L. Yao, "On the Determination of Battery Energy Storage Capacity and Short-Term Power Dispatch of a Wind Farm," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 148-158, April 2011.
- [4] Satoru Akagi, Shinya Yoshizawa, Jun Yoshinaga, Masakazu Ito, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Takashi Yano, Hideaki Nakahata, Toshiya Hisada & Xuan Mai Tran (2016) Capacity determination of a battery energy storage system based on the control performance of load leveling and voltage control, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 6:1, 94-101, DOI: 10.1080/22348972.2016.1173785
- [5] J. Mitra and M. R. Vallem, "Determination of Storage Required to Meet Reliability Guarantees on Island-Capable Microgrids With Intermittent Sources," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2360-2367, Nov. 2012.
- [6] Thongchart Kerdphol, Kiyotaka Fuji, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, Yaser Qudaih, Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids, *Electrical Power and Energy Systems* 81 (2016) 32-39
- [7] Halina Lorenc (red.) Atlas klimatu Polski, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005
- [8] K. B.-S. a. P. K. G. Ádám, „International Conference on Renewable Energies and Power Quality,” w *Energy production estimating of photovoltaic systems*, Santiago de Compostela (Spain), 2012.
- [9] Z. Lubośny, *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, Warszawa: Wydawnictwo WNT, 2009, 2012.
- [10] „<http://www.windpowerengineering.com/construction/calculate-wind-power-output/>,” [Online]. [Data uzyskania dostępu: 22 Sierpień 2016].
- [11] Bartosik M, Kamrat W, Kazimierkowski M., Lewandowski W., Pawlik M., Peryt T., Skoczkowski T., Strupczewski A., Szelaż A., Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12/2016.
- [12] JOINT RESEARCH CENTRE, „2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan,” 2011.