

Mieczysław KWIATKOWSKI*

Wykorzystywanie technologii magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza w ramach integracji farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym

Streszczenie: Wykorzystanie energii wiatru do produkcji energii elektrycznej jako część wykorzystywania energii odnawialnej podlega w wielu krajach gwałtownemu rozwojowi. Źródła wiatrowe ze względu na swoją specyfikę pracy, przy większych mocach zainstalowanych, wymagają ze strony operatorów sieci elektroenergetycznej podejmowania działań integrujących te źródła z systemem elektroenergetycznym dla zapewnienia jego niezawodności.

Z całego pakietu możliwych przedsięwzięć integracyjnych, jedną z obiecujących w wymiarze praktycznym dziedzin są przedsięwzięcia związane z magazynowaniem energii wytworzonej przez źródła wiatrowe. Z przedsięwzięć dotyczących magazynowania energii coraz większe znaczenie w krajach przodujących w rozwoju energetyki wiatrowej mają technologie magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza (ang. *compressed air storage system* – CAES).

Niniejszy artykuł opisuje w sposób syntetyczny sposoby integracji energetyki wiatrowej z systemem elektroenergetycznym, w tym magazynowanie energii. W ramach tych technologii szczególną uwagę poświęcono magazynowaniu sprężonego powietrza. Dokonano przeglądu wykorzystywanych rozwiązań technologicznych oraz korzyści z ich stosowania.

Słowa kluczowe: energia odnawialna, energia wiatru, farma wiatrowa, magazynowanie energii, sprężone powietrze

The application of compressed air energy storage technology under the wind farms integration with the power system

Abstract: The use of wind energy for electricity production is a branch of renewable energy, which is currently the subject of rapid development in many countries. On the other hand wind sources characterized by a specificity of work due to which the larger installed capacity they require, inter alia, by the network

* Dr inż., Centrum Zastosowań Zaawansowanych Technologii (CATA) Sp. o.o.

operators, additional actions ensure such integration with the power system to maintain its integrity and reliability.

From the total spectrum of possible integrating measures, one of the most promising in a practical dimension is related to the storage of energy generated by wind sources. The technology which is particularly important, especially for the countries with significant share of wind installed capacity, is the Compressed Air Energy Storage (CAES) technology.

This paper describes in the synthetic way the methods of integration of wind energy with the power system, including the use of energy storage technologies. The paper focuses on the storage of compressed air. A review of possible technological solutions and examples of their practical application are presented. Also conclusions dedicated to the potential implementation in the Polish conditions are included.

Key words: renewable energy, wind energy, wind farm, energy storage, compressed air

Wprowadzenie

Ekspansja energetyki wiatrowej – jako efekt realizacji polityki energetycznej i ekologicznej wspierającej rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) – powoduje nowe wyzwania dla systemów elektroenergetycznych. Dotyczą one zarówno zagadnień związanych z przyłączaniem nowych mocy w źródłach wiatrowych do sieci elektroenergetycznej, jak i z prowadzeniem ruchu systemu elektroenergetycznego przy uwzględnieniu specyfiki pracy tych źródeł.

Sprostanie tym wyzwaniom może być realizowane poprzez szereg działań określanych zbiorczo jako integracja energetyki wiatrowej z systemem elektroenergetycznym. Ich głównym celem jest łagodzenie wpływu pracy tych źródeł na system elektroenergetyczny. Jednym z możliwych kierunków działań w ramach tej integracji jest współpraca źródeł wiatrowych z technologiami umożliwiającymi magazynowanie energii.

W dalszej części referatu zaprezentowano informacje na temat specyficznych cech pracy źródeł wiatrowych, rolę magazynowania energii wśród przedsięwzięć integrujących energetykę wiatrową z systemem elektroenergetycznym oraz konkretne rozwiązania praktyczne (wdrożone lub planowane do wdrożenia).

1. Specyfika pracy źródeł wiatrowych

W praktyce współpracy z systemem elektroenergetycznym źródła wiatrowe służące do produkcji energii elektrycznej określane są jako pracujące w sposób sporadyczny (ang. *intermittent*) [1]. W stosunku do konwencjonalnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej, praca źródeł wiatrowych różni się w sposób zasadniczy i charakteryzuje się:

a) małą podatnością na sterowanie (wpływanie na sposób ich pracy)

Turbiny wiatrowe pracują w zależności od bieżącej prędkości wiatru. Moc generowana przez turbinę wiatrową jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru. Najczęściej stosowane ograniczenia konstrukcyjne turbin polegają na ich wyłączeniu (uniemożliwieniu pracy) przy zbyt niskiej lub przy zbyt wysokiej prędkości wiatru;

b) dużą zmiennością obciążenia (wartości generowanej mocy)

Uzależnienie generacji energii elektrycznej w źródłach wiatrowych od bieżącej prędkości wiatru daje w efekcie dużą jej zmienność. W praktyce duże zmienności obciążeń występują dla każdego przedziału czasowego.

Generacja mierzona w tych samych przedziałach czasowych, lecz w różnych okresach także charakteryzuje się zróżnicowaniem. W praktyce moc generacyjną w wysokości co najmniej 80% mocy znamionowej turbina osiąga przez około 10% czasu rocznego;

c) małą przewidywalnością pracy w kolejnych okresach czasowych

Niższa przewidywalność przyszłej pracy źródeł wiatrowych jest pochodną dokładności prognoz meteorologicznych, dotyczących kierunku i prędkości wiatru, przekładających się na możliwość produkcji energii elektrycznej. Prognozy te dla średniego i długiego horyzontu czasowego (do 10 dni) pochodzą z globalnych modeli meteorologicznych przetwarzających dane pogodowe pochodzące zarówno z terenowych stacji meteorologicznych, jak i z obserwacji satelitarnych. Wyniki z globalnych modeli prognostycznych są przenoszone do modeli krajowych, gdzie stosuje się dokładniejsze siatki terenowe.

Możliwe błędy prognoz z globalnych modeli pogodowych, przeskalowywanie wyników prognoz z modeli globalnych na prognozy krajowe, sposób modelowania lokalnych uwarunkowań terenowych dla rzeczywistych farm oraz różnice w interpretowaniu wyników prognostycznych (różne wysokości od poziomu terenu danych, prognoz i położenia śmigieł turbin wiatrowych) powodują stosunkowo niską dokładność tych prognoz. Z porównań prognoz *ex post* prędkości wiatru z wartościami zmierzonymi wynika, że dla horyzontu kilkugodzinnego otrzymuje się błąd rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

2. Integracja źródeł wiatrowych z systemem elektroenergetycznym

Działania zmierzające do integracji odnawialnych źródeł energii elektrycznej – w tym w szczególności źródeł wiatrowych – z systemem elektroenergetycznym mogą być sklasyfikowane w trzech podstawowych grupach. Są to:

1. Działania dostosowawcze w zakresie istniejącej struktury mocy wytwórczych w systemie elektroenergetycznym.
2. Wykorzystywanie możliwości magazynowania energii.
3. Uruchomienie przedsięwzięć w zakresie sterowania popytem (ang. *demand response* – DR).

Rysunek 1 prezentuje trzy podstawowe grupy działań zapewniających integrację OZE (w tym źródeł wiatrowych) z systemem elektroenergetycznym wraz z możliwymi działaniami szczegółowymi.

Pierwsza z wymienionych grup działań ma na celu przystosowanie struktury mocy konwencjonalnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej do zastępowania pracy źródeł odnawialnych innymi źródłami wytwarzania w przypadku ograniczania w tych pierwszych produkcji lub w przypadku zupełnego braku generacji. Do tych działań zalicza się:

- zwiększenie udziału źródeł wytwarzania o szybkim starcie (wprowadzenie na szerszą skalę źródeł szczytowych lub interwencyjnych),
- przystosowanie istniejących konwencjonalnych źródeł wytwarzania do szybszego przejmowania obciążenia,
- zwiększenie zakresu pracy istniejących źródeł konwencjonalnych,
- zwiększenie zdolności regulacyjnych całego systemu elektroenergetycznego.

Działania w kierunku stworzenia zdolności do magazynowania energii mają zapewnić łagodzenie wpływu na system elektroenergetyczny źródeł odnawialnych poprzez wpro-



Rys. 1. Grupy działań w ramach integracji OZE z systemem elektroenergetycznym
Źródło: [2]

Fig. 1. Groups of actions within the frame of renewable energy sources integration with the power system

wadzenie możliwości okresowego magazynowania wytworzonej w tych źródłach energii elektrycznej. Magazynowanie może dotyczyć okresów czasowych, kiedy popyt na energię elektryczną jej odbiorców są mniejszy. Natomiast zwrotne oddawanie energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej może dotyczyć okresów zwiększonego zapotrzebowania odbiorców, niezależnie od stanu bieżącej pracy tych źródeł. Magazynowanie energii wytworzonej przez OZE umożliwia:

- przenoszenie generacji energii elektrycznej z godzin pozaszczytowych na godziny szczytowe,
- ograniczenie konieczności przeciążania konwencjonalnych źródeł wytwórczych,
- poprawę parametrów napięciowych systemu elektroenergetycznego,
- zwiększenie zdolności regulacyjnych całego systemu elektroenergetycznego (jak w przypadku poprawy struktury mocy wytwórczych).

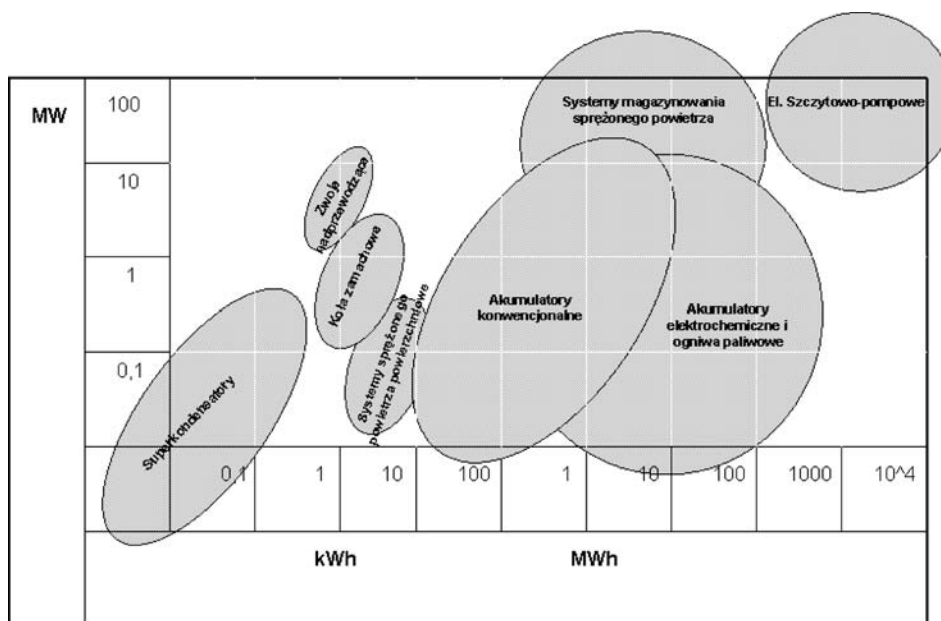
W przypadku działań związanych ze sterowaniem popytem odbiorców końcowych, rozszerzenie zarządzania popytem dotyczy wprowadzenia przez operatorów sieciowych (OSP lub OSD) zachęt ekonomicznych (np. w postaci specjalnych taryf) lub specjalnych umów zapewniających operatorom wpływ na pobór mocy i energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej pod kątem bieżącej pracy źródeł wiatrowych. W szczególności dotyczy to:

- stosowania taryf uzależniających obciążenie odbiorców od sygnałów cenowych,
- wprowadzenie możliwości zmiany obciążenia odbiorców końcowych na sygnały operatora systemu przesyłowego (liczniki inteligentne),
- uzależnienie obciążenia odbiorców od zmian częstotliwości w sieci i/lub od wielkości bieżącej produkcji ze źródeł odnawialnych.

W dalszej części referatu przedstawiono dostępne technologie magazynowania energii oraz możliwości ich wykorzystania do współpracy z farmami wiatrowymi.

3. Magazynowanie energii – dostępne technologie

Na rysunku 2 zaprezentowano rozkład typowych mocy i możliwości magazynowania energii elektrycznej pochodzącej z OZE (w tym ze źródeł wiatrowych) dla wybranych technologii.



Rys. 2. Rozkład typowych mocy i możliwości magazynowania energii elektrycznej przy wykorzystaniu niektórych technologii
Źródło: [3]

Fig. 2. Distribution of typical capacities and electricity storage capabilities using selected technologies

Najważniejszymi parametrami decydującymi o możliwości wykorzystania poszczególnych technologii magazynowania są: nominalna moc technologii, zdolność magazynowania energii, czas rozładowywania w ramach jednego cyklu pracy oraz jednostkowy koszt inwestycyjny. Innymi parametrami decydującymi o możliwości wykorzystania mogą również być: sprawność, gabaryty zewnętrzne, czas życia oraz dostępność.

Biorąc pod uwagę możliwość magazynowania energii odniesioną do jednostki mocy, w przypadku współpracy ze źródłami wiatrowymi technologie można podzielić na umożliwiające kompensację ich pracy w okresach krótko- i długoterminowych. Dla pojedynczych turbin wiatrowych w okresie krótkoterminowym potrzeby magazynowania wynoszą w granicach 5–10 kWh/MW mocy zainstalowanej. Do tych celów mogą być stosowane takie technologie, jak: baterie akumulatorów konwencjonalnych, koła zamachowe lub zwoje magnetyczne nadprzewodzące (przyszła technologia). Do zastosowań okresowych, gdzie potrzeby w zakresie magazynowania wynoszą kilka MWh/MW, mogą być również wykorzystane akumulatory elektrochemiczne (przyszła technologia) lub ogniwa paliwowe.

W przypadku farm wiatrowych o całkowitej mocy zainstalowanych turbin wiatrowych od kilkudziesięciu do kilkuset MW potrzeby w zakresie magazynowania energii są znacznie większe. Przy kompensacji krótkoterminowej potrzeby w zakresie magazynowania mogą rozpoczynać się od kilku MWh, natomiast okresowo mogą dotyczyć od kilkuset do kilku tysięcy MWh. Największe zdolności magazynowania spośród opisywanych technologii mają elektrownie szczytowo-pompowe lub instalacje magazynowania sprężonego powietrza.

Poniżej w tabeli 1 przedstawiono zestawienie podstawowych parametrów technicznych dla technologii magazynowania energii elektrycznej, które mogą być wykorzystane do integracji źródeł wiatrowych z systemem elektroenergetycznym.

TABELA 1. Porównanie podstawowych parametrów technicznych technologii magazynowania energii do wykorzystania do współpracy ze źródłami wiatrowymi

TABLE 1. Comparison of basic technical parameters for energy storage technologies used for cooperation with wind sources

Lp.	Nazwa technologii	Sprawność cyklu [%]	Moc nominalna [MW]	Czas rozładowania w godzinach
1.	Elektrownia szczytowo-pompowa	80	100–1 000	> 1 godzina
2.	System magazynowania sprężonego powietrza	60–75	0,1–1 000	< kilka godzin
3.	Koło zamachowe	90	0,1–10	0,1
4.	Konwencjonalny akumulator	60–80	0,1–10	0,1 ... > 1
5.	Akumulator elektrochemiczny	70	0,1–20	> 1
6.	Ogniwo paliwowe wodorowe	50	0,1–1	> 1

Źródło: [3]

Wszystkie z zamieszczonych w tabeli 1 technologii cechują się stosunkowo wysoką sprawnością. Najniższą mają ogniwa paliwowe (ok. 50%), natomiast najwyższą cechują się koła zamachowe (ok. 90%).

Opierając się na danych amerykańskiego *Electric Power Research Institute* (EPRI) w kolejnej tabeli 2 przedstawiono jednostkowe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne poszczególnych technologii magazynowania energii (w cenach 2008 roku).

Czas pracy podany w powyższej tabeli dotyczy czasu rozładowania w ramach jednego cyklu pracy. Dla technologii wykorzystujących akumulatory w kosztach inwestycyjnych nie uwzględniono okresowej konieczności wymiany ogniw. Prezentowane zestawienie kosztowe podlega cyklicznej aktualizacji przez EPRI.

W przypadku technologii mogących współpracować z farmami wiatrowymi bardzo korzystne z punktu widzenia efektywności ekonomicznej okazują się technologie polegające na podziemnym magazynowaniu sprężonego powietrza. Technologie te przy zbliżonej mocy i porównywalnych możliwościach magazynowania energii w stosunku do elektrowni szczytowo-pompowej wymagają krótszego cyklu inwestycyjnego oraz charakteryzują się niższymi kosztami eksploatacyjnymi.

TABELA 2. Porównanie jednostkowych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wybranych technologii magazynowania energii

TABLE 2. Comparison of specific investment and operation costs for selected energy storage technologies

Lp.	Nazwa technologii	Jednostkowy koszt inwestycyjny [\$/kW]	Koszt zmienny eksploatacyjny [\$/kWh]	Czas pracy [godz.]
1.	Systemy sprężonego powietrza: – duże, podziemne wyrobiska solne (100–300 MW)	590–730	1–2	10
	– małe, naziemne (10–20 MW)	700–800	200–250	4
2.	Elektrownie szczytowo-pompowe (1000 MW)	1 500–2 000	100–200	10
3.	Akumulatory (10 MW): – kwasowe, przemysłowe	420–660	330–480	4
	– zaawansowane (docelowo)	450–550	350–400	4
	– elektrochemiczne (docelowo)	425–1 300	280–450	4
4.	Koła zamachowe (docelowo) (100 MW)	3 360–3 920	1 340–1 570	0,25
5.	Cewki magnetyczne nadprzewodzące (1 MW)	200–250	650 000–860 000	1/3 600
6.	Superkondensatory (docelowo)	250–350	20 000–30 000	1/360

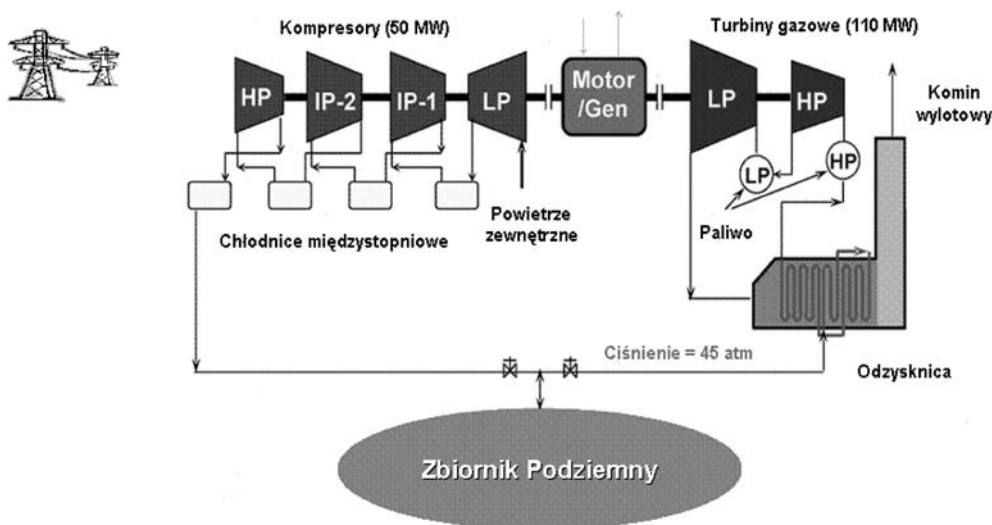
Źródło: [4]

4. Magazynowanie energii w postaci sprężonego powietrza

Instalacje magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza są już wykorzystywane do współpracy z systemem elektroenergetycznym. Dwie największe istniejące instalacje tego typu wykorzystujące zbiorniki podziemne do magazynowania sprężonego powietrza są zlokalizowane w Huntorf (Niemcy) o mocy 300 MW oraz w stanie Alabama (USA) w postaci tzw. projektu Mc Intosh o mocy 110 MW. Instalacja niemiecka pełni funkcje rezerwowego źródła zasilania dla zlokalizowanych w regionie elektrowni jądrowych, natomiast instalacja amerykańska jest typowym źródłem mocy szczytowej dla lokalnego przedsiębiorstwa elektroenergetycznego (*Alabama Electric Cooperative – AEC*).

Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat instalacji projektu Mc Intosh. Składa się ona z następujących podstawowych elementów:

- zespołu kompresorów (sprężarek) o mocy 50 MW, służących do zatłaczania powietrza do zbiornika podziemnego,
- zbiornika podziemnego w wyeksploatowanym wyrobisku solnym o pojemności około 2 mln m³ zlokalizowanego na głębokości około 500 m,
- zespołu turbin gazowych o mocy 110 MW zasilanych gazem ziemnym i sprężonym powietrzem ze zbiornika,
- odzyskniczy podgrzewającej sprężone powietrze kierowane do turbin gazowych za pomocą ciepła spalin z tych turbin,



Rys. 3. Schemat działania instalacji magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza o mocy 110 MW (projekt Mc Intosh)
 Źródło: [4]

Fig. 3. Diagram of compressed air energy storage installation with the capacity of 110 MW (Mc Intosh Project)

e) maszyny elektrycznej odwracalnej, w zależności od bieżących potrzeb pełniącej funkcję silnika elektrycznego napędzającego sprężarki lub generatora energii elektrycznej napędzanego przez turbiny gazowe.

Całkowita sprawność instalacji wynosi 81%, a powietrze w zbiorniku podziemnym jest sprężane maksymalnie do ciśnienia wynoszącego około 45 atm. Szacunkowy koszt inwestycyjny tej instalacji wynosi około 730–830 \$/kW (w cenach 2008 r.).

Przy współpracy z farmą wiatrową przykładowy cykl pracy układu „farma wiatrowa – instalacja magazynowania” może być następujący:

- farma wiatrowa w trakcie swojej rutynowej pracy oddaje wyprodukowaną energię elektryczną wprost do sieci elektroenergetycznej,
- w momentach niższego zapotrzebowania odbiorców końcowych (np. w nocy), gdy energia elektryczna jest tańsza, energia elektryczna wytworzona przez farmę wiatrową zasila silnik elektryczny napędzający sprężarki zatłaczające sprężone powietrze do zbiornika podziemnego,
- w dzień, w czasie większego zapotrzebowania (gdy energia elektryczna jest droższa) poza energią elektryczną wyprodukowaną przez farmę wiatrową i przekazywaną na bieżąco do sieci elektroenergetycznej, również do tej sieci jest przekazywana energia elektryczna z generatora napędzanego przez turbiny gazowe wykorzystujące mieszankę gazu ziemnego i sprężonego powietrza,
- w kolejnym okresie niższego zapotrzebowania (w nocy) farma ponownie produkuje energię elektryczną do napędzania silnika i sprężarek tłoczących powietrze do podziemnego zbiornika itd.

Najistotniejszym problemem dla całego układu „farma wiatrowa – instalacja magazynowania” jest jego odpowiednie zoptymalizowanie pod kątem potrzeb systemu elektro-

energetycznego. Dotyczy to właściwego doboru wielkości zbiornika podziemnego, mocy elektrycznej dostarczanej przez farmę wiatrową, mocy sprężarek i mocy turbin gazowych. W zależności od przyjętych założeń, układ współpracy farmy wiatrowej z instalacją magazynującą może dokonywać opróżniania zbiornika podziemnego w cyklu dobowym lub np. w cyklu tygodniowym.

Przy odpowiednio dobranej mocy urządzeń naziemnych w stosunku do pojemności zbiornika istnieje możliwość tylko częściowego jego opróżniania w dni robocze i częściowego zwrotnego doładowywania. Zapobieganie całkowitemu opróżnianiu zbiornika podziemnego daje takiej instalacji również zdolność do pracy interwencyjnej w przypadku pojawiania się nieprzewidzianych zagrożeń w integralności systemu elektroenergetycznego. Pod tym względem podstawowa zasada pracy instalacji nie różni się od pracy elektrowni szczytowo-pompowej. Jej wspomnianą już wcześniej zaletą są natomiast niższe koszty, zarówno inwestycyjne, jak i eksploatacyjne.

Ograniczenie zużycia gazu praktycznie do zera, podobnie jak i emisji spalin powstających w procesie jego spalania, jest możliwe poprzez zastosowanie tzw. przemiany adiabaticznej. Polega ona na dodatkowym umieszczeniu w obiegu cieplnym instalacji akumulatora ciepła powstającego w wyniku sprężania powietrza i powtórne jego wykorzystanie przy rozprężaniu.

Ograniczeniem w budowie instalacji magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza jest konieczność powiązania lokalizacji farm wiatrowych i podziemnych warstw geologicznych nadających się na zbiorniki sprężonego powietrza. Bierze się tutaj pod uwagę podziemne wyrobisko po zakończeniu wydobywania soli lub węglowodorów (ropy naftowej lub gazu ziemnego), a także skalne struktury porowate (np. piaskowce). Również tzw. typoszeregi turbin gazowych i sprężarek oferowane przez producentów tego sprzętu nie zawsze dokładnie odpowiadają potrzebom instalacji wynikającym z obliczeń projektowych.

W ciągu ostatnich trzech lata podjęto w USA badania nad opracowaniem turbiny wiatrowej wyposażonej w osi śmigła bezpośrednio w sprężarkę powietrza zamiast generatora elektrycznego. Turbina wiatrowa służyłaby wtedy bezpośrednio do zatłaczania sprężonego powietrza do zbiornika podziemnego i dalej w sposób konwencjonalny wykorzystanie sprężonego powietrza do produkcji energii elektrycznej. Takie rozwiązanie technologiczne, w porównaniu do konwencjonalnej turbiny wiatrowej, pomija dwie przemiany energii. Jej opanowanie na skalę przemysłową zlikwidowałoby w zupełności problemy współpracy źródeł wiatrowych z systemem elektroenergetycznym wynikające z nieprzewidywalności ich pracy.

5. Nowe projekty implementacji technologii magazynowania sprężonego powietrza

Opisana w poprzednim punkcie referatu technologia magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza będzie wykorzystana w ramach trwającej już w USA realizacji projektu pn. *Iowa Stored Energy Park* (ISEP) [5]. Projekt jest współfinansowany przez amerykański Departament Energetyki i bierze w nim udział grupa około 100 przedsiębiorstw elektroenergetycznych ze stanu Iowa. Połączona z wyeksploatowanym podziemnym wyro-

biskiem solnym instalacja będzie miała możliwość magazynowania energii elektrycznej wyprodukowanej w farmach wiatrowych w celu zapewnienia dostarczenia mocy do 270 MW w okresie maksymalnie przez 16 godzin w ciągu każdego dnia. Planuje się uruchomienie instalacji w 2011 roku.

Zaawansowane są prace nad uruchomieniem kolejnego projektu w lokalizacji nieczynnej kopalni wapienia koło miejscowości Norton w stanie Ohio. Przewiduje się tam zbudowanie instalacji współpracującej z farmami wiatrowymi i dającej moc 800 MW z perspektywą rozbudowy do 2700 MW. Podziemny zbiornik powietrza miałby sprężać powietrze do ciśnienia od 55 do 110 barów [6].

Wiele publikacji wskazuje, że regionem Stanów Zjednoczonych mającym duży potencjał z punktu widzenia rozwoju technologii magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza w powiązaniu z energetyką wiatrową będzie stan Teksas. Wynika to z jednej strony ze szczególnie szybkiego rozwoju energetyki wiatrowej w tym stanie, z drugiej strony z istniejących szczególnych ograniczeń przesyłowych w sieci elektroenergetycznej oraz słabości (w relacji do potrzeb) powiązań sieciowych z sąsiednimi stanami.

Opracowywane analizy wykonalności kolejnych potencjalnych projektów dotyczących współpracy farm wiatrowych z technologią CAES mają na celu integrację farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym poprzez nie tylko łagodzenie wpływu specyfiki ich pracy na system elektroenergetyczny, ale również i łagodzenie ograniczeń przesyłowych w sieci.

Tematyką magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza zainteresowane są również Niemcy, będące europejskim liderem w zakresie rozwoju energetyki wiatrowej. Zgodnie z dostępnymi informacjami [7] konsorcjum firm niemieckich planuje uruchomienie do 2013 roku instalacji pilotowej (tzw. projekt ADELE) o zdolności magazynowania energii odpowiadającej 1 GWh energii elektrycznej oraz osiągającej moc do 200 MW, która ma być wykorzystywana m.in. jako źródło szybkiej mocy rezerwowej dla systemu elektroenergetycznego. Przewiduje się, że instalacja będzie wykorzystywać przemianę adiabatyczną.

6. Zastosowanie technologii magazynowania sprężonego powietrza w warunkach polskich

Za celowością zainteresowania się w Polsce technologią magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza przemawiają następujące, istotne w ocenie autora niniejszego referatu, argumenty:

- dostępne prognozy rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce (m.in. Polityka energetyczna [8], zagraniczne prognozy eksperckie [9], zainteresowanie inwestorów i związane z tym składanie do elektroenergetycznych przedsiębiorstw sieciowych wniosków o wydanie warunków przyłączenia [10]) plasują kraj w ciągu następnych 5–10 lat w czołówce europejskich krajów rozwijających energetykę wiatrową,
- biorąc pod uwagę specyfikę pracy źródeł wiatrowych oraz problemy natury formalnej związane z rozbudową sieci elektroenergetycznej w kraju, magazynowanie energii w postaci sprężonego powietrza może się przyczynić do łagodzenia skutków integracji farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym przez lepsze dostosowanie

produkcji z tych obiektów do potrzeb odbiorców tej energii oraz do uzyskania dodatkowych korzyści ekonomicznych,

- podawane dla technologii CAES jednostkowe nakłady inwestycyjne oraz długość cyklu inwestycyjnego wskazują, że jest ona konkurencyjna w stosunku do innych technologii magazynowania energii na dużą skalę (np. elektrowni szczytowo-pompowych) i może być w powiązaniu ze źródłami wiatrowymi wykorzystywana zarówno jako źródło mocy interwencyjnej w systemie elektroenergetycznym o krótkim czasie osiągnięcia pełnej mocy (rzędu do kilku minut), jak i jako programowalne źródło energii elektrycznej,
- praca programowa instalacji magazynowania sprężonego powietrza pozwoliłaby na oddawanie do sieci – w godzinach zwiększonego zapotrzebowania – energii elektrycznej wyprodukowanej przez farmy wiatrowe w czasie obniżonego zapotrzebowania, a efektywność ekonomiczna całego przedsięwzięcia wynikałaby z różnicy cen energii elektrycznej pomiędzy tymi dwoma okresami.

Realne decyzje dotyczące ew. wdrożenia w kraju tej technologii powinny wynikać z techniczno-ekonomicznego studium wykonalności takiego przedsięwzięcia w warunkach krajowych i korzyści możliwych do uzyskania przez różne podmioty (np. operatorów sieci elektroenergetycznych, inne firmy energetyczne lub inwestorów farm wiatrowych). Wydaje się, że tematyka takiego studium, ze względu na jej znaczenie dla rozwoju wykorzystania energii odnawialnej, mogłaby być atrakcyjną opcją do pozyskania współfinansowania w ramach funduszy pomocowych.

Podsumowanie

1. Artykuł opisuje specyfikę pracy źródeł wytwarzania energii elektrycznej wykorzystujących energię odnawialną w postaci energii wiatru oraz technologie pozwalające na integrację tych źródeł z systemem elektroenergetycznym. Do technologii tych należy również magazynowanie energii.
2. Zaprezentowano stosowane technologie magazynowania energii oraz możliwości ich współpracy z odnawialnymi źródłami energii elektrycznej. Dla przedstawionych technologii magazynowania porównano ich podstawowe parametry techniczno-ekonomiczne.
3. Wśród technologii wykorzystywanych do magazynowania energii na większą skalę, na wyróżnienie zasługuje technologia magazynowania sprężonego powietrza. Omówiono zasadę jej działania oraz możliwości współpracy ze źródłami wiatrowymi. Podano przykłady realizacji praktycznych instalacji wykorzystujących technologię CAES uruchomionych lub planowanych do uruchomienia w USA i w Niemczech.
4. Na podstawie zebranych argumentów zaproponowano realizację studium wykonalności zastosowania tej technologii w warunkach polskich.

Literatura

- [1] Swider D.J., Weber C., 2006 – An Electricity Market Model to Estimate the Marginal Value of Wind in an Adapting System. IEEE Power Engineering Society 2006 General Meeting, 18–20 June, Canada.

- [2] Isser S., 2007 – Demand Response and Integration of Renewable Generation Resources. Materiał roboczy Good Company Associates.
- [3] Lund P.D., Paatero J.V., 2006 – Energy Storage Options for Improving Wind Power Quality. Nordic Wind Power Conference, 22–23 May, Espoo, Finland.
- [4] Schainker R.B., 2009 – EPRI Advanced Compressed Air Energy Storage (CAES) Demonstration Project. Electric Power Research Institute (EPRI). Palo Alto. March 31.
- [5] Gardner J., Haynes T., 2007 – Overview of Compressed Air Energy Storage. Boise State University. December 2007.
- [6] Succar S., Williams R.H., 2008 – Compressed Air Energy Storage: Theory, resources, And Applications For Wind Power. Energy Systems Analysis Group, Princeton Environmental Institute, Princeton University, 8 April 2008.
- [7] ADELE to store electricity efficiently, safely and in large quantities, informacja prasowa ze strony internetowej RWE AG (www.rwe.com/cms/en), 20 January 2010.
- [8] Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Ministerstwo Gospodarki. Warszawa 2009 r. (dokument przyjęty przez Radę Ministrów w dn. 10.11.2009 r.).
- [9] Statistics and prospects for the European electricity sector (1980–2000, 2004, 2006, 2007, 2010–2030). 37th Edition. EURPROG 2009. EURELECTRIC 2009.
- [10] Plan Rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2010–2025. Wyciąg; Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., Konstancin-Jeziorna marzec 2010.