

MAGAZYNOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ - MARZENIE CZY KONIECZNOŚĆ?

Artur WILCZYŃSKI¹, Henryk WOJCIECHOWSKI²

1. Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny
tel.: 71 320 28 54, e-mail: artur.wilczynski@pwr.edu.pl
2. Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny
tel.: 71 320 39 52, e-mail: henryk.wojciechowski@pwr.edu.pl

Streszczenie: Układy technologiczne wykorzystujące odnawialne źródła energii do produkcji energii elektrycznej zwiększają swój udział w krajowym bilansie energetycznym. Produkcja energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych, fotowoltaicznych oraz wodnych cechuje dużą zmienność, mająca najczęściej charakter stochastyczny. To sprawia, że bieżące bilansowanie popytu z podażą energii elektrycznej jest utrudnione. Do zrównoważenia popytu i podaży energii konieczne zatem jest jej magazynowanie. W artykule przedstawiono techniczno-ekonomiczną analizę porównawczą magazynowania energii elektrycznej w skroplonym powietrzu i w elektrowni pompowej. Do przechowywania energii na dużą skalę może być wykorzystywany wodór. Jest to czysty i bezpieczny nośnik energii.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, magazynowanie energii elektrycznej, elektrownia pompowa, magazynowanie energii w skroplonym powietrzu, wodór.

1. WPROWADZENIE

Rosnąca liczba układów technologicznych, wykorzystujących odnawialne źródła energii, których produkcja cechuje się dużą zmiennością, stwarza operatorom systemów dystrybucyjnych problemy związane z bilansowaniem energii elektrycznej. Integracja takich układów technologicznych z magazynami energii elektrycznej o określonej zdolności magazynowania umożliwia bieżące równoważenie popytu i podaży. Magazynowanie rozważanej energii na dużą skalę dokonywane jest w elektrowniach pompowych o sprawności magazynowania (70÷73)%. Ich cechą charakterystyczną jest znaczące oddziaływanie na środowisko przyrodnicze, ponadto wymagają odpowiednio ukształtowanego terenu. Od kilku już lat do magazynowania energii elektrycznej znajduje zastosowanie magazynowanie energii elektrycznej w zbiornikach ze skroplonym powietrzu, których lokalizacja nie ma praktycznie ograniczeń i nie wymagają wykonywania raportów oddziaływania na środowisko, a ich sprawność magazynowania energii osiąga poziom (60÷70)%, natomiast przy wykorzystywaniu ciepła i chłodu odpadowego nawet 90%.

2. TECHNOLOGIE MAGAZYNOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Rozwój technologii magazynowania energii elektrycznej ma już swoją dość długą historię. Opracowano wiele sposobów takiego magazynowania, a technologie tego procesu są doskonalone i dostosowywane do wymagań konsumentów i sieci elektroenergetycznych, przede wszystkim związanych z pewnością dostaw energii. W rezultacie występuje szeroki wachlarz rozwiązań technologicznych magazynowania energii, który umożliwia tworzenie bardziej elastycznej infrastruktury energetycznej, cechującej się wyższą efektywnością ekonomiczną. Można dokonać klasyfikacji technologii magazynowania energii, biorąc pod uwagę wykorzystywane w tym procesie zjawiska fizyczne i chemiczne [1, 2, 3]:

- elektrochemię – baterie, akumulatory, odwracalne ogniwa paliwowe,
- pole elektromagnetyczne – kondensatory i superkondensatory,
- pole magnetyczne – systemy magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących (SMES – superconducting magnetic Energy Storage),
- fizykochemiczne – magazynowanie ciepła/chłodu, magazynowanie energii w kołach zamachowych, sprężonym gazie lub powietrzu, skroplonym powietrzu oraz wodnych układach pompowych.

3. EFEKTY SYNERGII WYTWARZANIA I MAGAZYNOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z OZE

Istotnym wyzwaniem dla operatorów systemów dystrybucyjnych jest skuteczna i efektywna integracja niekonwencjonalnych układów technologicznych wykorzystujących odnawialne źródła energii, cechujących się dużą zmiennością produkcji z systemem elektroenergetycznym. Atrakcyjną odpowiedzią na to wyzwanie jest wykorzystanie rozproszonych magazynów energii elektrycznej, gromadzących nadmiar produkowanej energii z elektrowni fotowoltaicznych

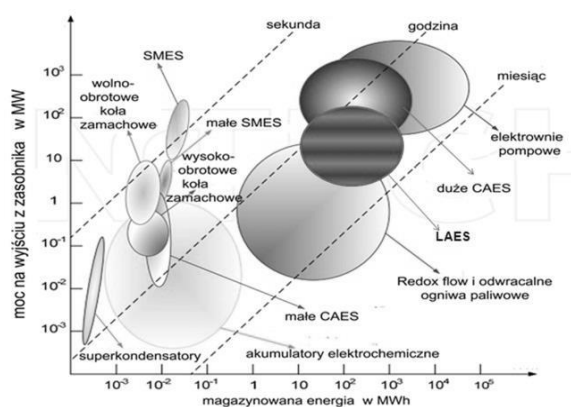
i wiatrowych. Synergia wytwarzania, w szczególności w okresach poza szczytami obciążeń, kiedy energia elektryczna ma niską cenę, oraz jej magazynowanie może być źródłem szeregu pozytywnych efektów i korzyści ekonomicznych. Magazyny umożliwiają uwolnienie energii elektrycznej w okresach o wyższym popycie na nią, czyli kiedy posiada znacząco wyższą cenę. Umożliwiają lepsze wykorzystanie technicznej infrastruktury sieci i konwencjonalnych elektrowni. Nadprodukcja energii w farmach wiatrowych w nocy może zostać załadowana do magazynów a następnie uwolniona w godzinach szczytu obciążenia systemu elektroenergetycznego.

Magazyny energii elektrycznej mogą być również wykorzystane przez operatorów sieci dystrybucyjnych do świadczenia usług w zakresie bezpieczeństwa dostaw energii odbiorcom i utrzymywania jakości energii na wymaganym poziomie.

Odpowiednia ilość magazynów energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym umożliwia generację mocy w elektrowniach konwencjonalnych na w miarę stałym poziomie, zaś zbilansowanie mocy generowanej w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych z zapotrzebowaniem przez odbiorców, nastąpi przez rozładowywanie i ładowanie magazynów energii elektrycznej.

4. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI EKONOMICZNEJ MAGAZYNOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Koszt zapewnienia prawidłowej eksploatacji i granicznych parametrów pracy, takich jak temperatura i systemy bezpieczeństwa są czynnikami, które muszą być uwzględniane przy ocenie czasu życia i kosztów całkowitych magazynowania energii. Moc na wyjściu i zdolność magazynowania energii w układzie są charakterystycznymi cechami technologii magazynowania. Szczególną uwagę na te różnice należy zwrócić przy interpretacji rys.1. Obszar poszczególnych sposobów magazynowania określa zakres energii i mocy, jaki może być uzyskany w poszczególnych technologiach magazynowania, nie uwzględniając czynników ekonomicznych. Nowe technologie magazynowania energii elektrycznej to: elektrownie pompowe posadowione w wyeksploatowanych kopalniach, magazynowanie w skroplonym powietrzu, produkcja i magazynowanie wodoru.

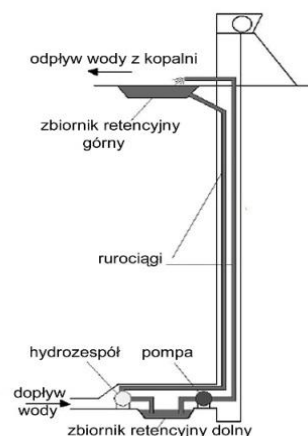


Rys.1. Moc uzyskiwana z magazynów energii [4]

SMES - magnetycznej w układach nadprzewodzących, CAES – w sprężonym powietrzu, LAES – w ciekłym powietrzu.

Podziemne zbiorniki lub zaadaptowane do tego wyrobiska w kopalniach mogą być dolnymi zbiornikami wody dla elektrowni pompowej (rys. 2). Na korzyść posadowienia elektrowni pompowej w kopalni przemawiają duże różnice wysokości pompowania, dostępna infrastruktura elektroenergetyczna oraz sprawność magazynowania energii, szacowana na poziomie (70÷75)% Wykorzystanie istniejącej instalacji do odwadniania już wyeksploatowanej kopalni, która musi być eksploatowana ze względu na możliwość zalewania wodą innych eksploatowanych kopalń, obniża nakłady inwestycyjne na instalację.

Przy przepływie wody wynoszącym 1 m³/s i spadzie 1000 m uzyskiwana moc w turbospole wodnym wynosi ok. 7 MW. Dwugodzinna praca generacyjna elektrowni pompowej o przepływie 1 m³/s, z uwzględnieniem dopływu wody do kopalni na poziomie 1 m³/s, wymaga, aby zbiornik wody na dole kopalni miał pojemność co najmniej 29 000 m³. Głębokość kopalni odgrywa ważną rolę zarówno z punktu widzenia ekonomicznego, jak i ekologicznego. Im większa wysokość spadku, tym mniej wody jest niezbędne do wytwarzania energii elektrycznej z hydrozespołów. Równie ważnym elementem przy posadowieniu elektrowni pompowej w kopalni jest brak sprzeciwu ze strony ekologów, którzy obecnie, na przykład w południowych Niemczech próbują zablokować budowę zbiorników powierzchniowych dla elektrowni pompowych [6]. Elektrownia pompowa znajdująca się pod ziemią nie będzie widoczna z powierzchni, ani nie będzie miała wpływu na przyrodę. Zanim jednak podejmie się decyzję o budowie elektrowni pompowej w kopalni, trzeba przeprowadzić analizę techniczno-ekonomiczną, uzasadniającą jej budowę.

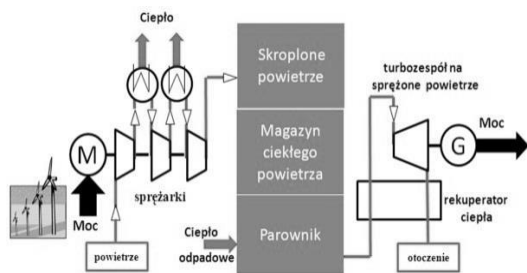


Rys.2. Elektrownia pompowa zainstalowana w podziemnej kopalni [5]

Jedną z najbardziej wydajnych metod magazynowania nadwyżek energii elektrycznej jest magazynowanie w skroplonym powietrzu LAES (ang. *Liquid Air Energy Storage*). W procesie tym powietrze zostaje sprężone, a następnie schłodzone do momentu, kiedy z pierwotnej postaci gazowej przechodzi do ciekłego stanu skupienia. Skroplone powietrze jest następnie magazynowane. Jeżeli zapotrzebowanie na energię elektryczną w sieci wzrasta, za pomocą pompy podnoszone jest ciśnienie ciekłego powietrza, które następnie paruje. Znajdujące się pod ciśnieniem powietrze w postaci gazowej jest ogrzewane i może zostać wykorzystane do wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach z turbinami na sprężone

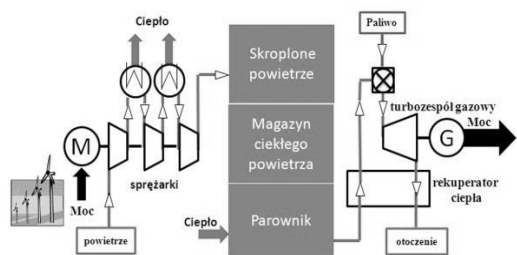
powietrze (rys. 3) lub w elektrowniach gazowych (rys.4). Technologia LAES nie podlega szczególnym wymaganiom geologicznym, co pozwala uniknąć żmudnych i skomplikowanych procedur uzyskania zezwoleń i otwiera możliwości jej szybkiego wdrożenia.

Wodór nie jest paliwem kopalnym, opracowanie taniej i wydajnej metody produkcji wodoru może zastąpić kopalne pierwotne nośniki energii. Metody produkcji wodoru: reforming benzyny, reforming metanu (mokry i suchy), elektroliza wody, metody biologiczne - algi, metoda Habera-Boscha -termiczny rozkład pary wodnej.



Rys.3. Magazynowanie energii elektrycznej w skroplonym powietrzu z turbospółem powietrznym

Sposoby magazynowania wodoru: sprężony w postaci gazowej, w postaci ciekłej, fizyczne wodorki metali, chemiczne wodorki metali, adsorbowanie na rurowatych strukturach węgla aktywowanego. Do otrzymania 1 kg wodoru w procesie elektrolizy wody zużywa się 43 kWh energii elektrycznej, co w elektrowni o sprawności wytwarzania energii elektrycznej 38% wymaga dostarczenia w paliwie 113,2 kWh. Ciepło spalania wodoru wynosi 39,38 kWh/kg, zatem sprawność pozyskiwania wodoru w procesie elektrolizy wody wynosi 35%. W przypadku wykorzystywania nadmiaru produkcji energii elektrycznej w elektrowniach fotowoltaicznych i elektrowniach wiatrowych do produkcji wodoru w procesie elektrolizy wody sprawność energetyczna (wytwarzania ciepła) wynosi $39,38/43 = 91,6\%$. Konwersja wodoru w ogniwie paliwowym na energię elektryczną w zależności od rodzaju ogniwa dokonuje się ze sprawnością (30÷60)%.



Rys.4. Magazynowanie energii elektrycznej w skroplonym powietrzu z turbospółem gazowym

Uśrednione koszty magazynowania energii w okresie eksploatacji LCOES (ang. *Levelized Cost of Energy Stored*) można obliczyć korzystając ze wzoru:

$$LCOES = \frac{CAPEX}{q N} \left[\frac{p(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} + \frac{OPEX}{CAPEX} \right] + \frac{k(1-\eta)}{\eta}$$

gdzie:

CAPEX – nakłady inwestycyjne na budowę w zł,

OPEX – koszt eksploatacyjny energii, zł/a

q – magazynowanie w cyklu, MWh/cykl

N – liczba cykli magazynowania w roku,

p – stopa kapitałowa,

k – koszt zakupu energii elektrycznej, zł/MWh,

n – okres eksploatacji magazynu energii, lata,

η – sprawność magazynowania energii.

Przykładowo, jeśli cena energii elektrycznej w godzinach szczytu sięga 200 USD/MWh (800 zł/MWh), a w nocy spada do 20 USD/MWh (80 zł/MWh), to różnica 180 USD/MWh (720 zł/MWh) może być potencjalnym zyskiem magazynu energii. Magazyn energii działający z efektywnością 70% będzie opłacalny, jeśli jego koszt użytkowania będzie mniejszy niż 126 USD/MWh (504 zł/MWh).

W tabeli 1 zestawiono jednostkowe koszty magazynowania energii w różnych technikach magazynowania energii [3].

Tabela 1. Porównanie różnych technik magazynowania energii [4,7]

Technologia	Moc nominalna w MW	Sprawność w %	Czas rozładowania	Okres eksploatacji w latach	Koszt magazynowania energii w USD/MWh	
elektrownia pompowa	100 - 5000	70 - 87	1 - 24 h	30 - 60	5 - 100	
magazynowanie w sprężonym powietrzu	50 - 300	70 - 89	1 - 24 h	20 - 40	2 - 120	
magazynowanie w skroplonym powietrzu	10 - 200	40 - 90	1 - 12 h	20 - 40+	260 - 530	
koła zamachowe	0.4 - 20	80 - 95	1 - 15 minut	15 - 20	1000 - 14 000	
magazynowanie wodoru i ogniwa paliwowe	0 - 50	20 - 85	s - 24 h	5 - 20	6 - 725	
baterie	plynne	0.03 - 3	65 - 85	s - 10 h	5 - 30+	150 - 1000
	Li-Ion	1 - 100	75 - 90	0.15 - 1 h	5 - 15 (4000-100000) **	600 - 3800
	metal-powietrze	0.01 - 50	ok.75	s - 5 h	(100-10 000) **	10 - 340
	NaS	0.05 - 34	75 - 90	s - 8 h	5 - 15 (2500-4500) **	300 - 500
	niklowe	0 - 40	60 - 90	s - 1 h	10 - 20 (1500-3000) **	800 - 1500
	kwasy-Pb	0 - 40	63 - 90	s - 10 h	5 - 20 (200-100) **	200 - 400
SMES-magazynowanie energii magnetycznej w układach nadprzewodzących	0.1 - 10	90 - 97	ms*s	20 - 30	1000 - 10000	
S.C.-magazynowanie energii w super kondensatorach	0 - 10	<75 - 98	ms*-1 h	8 - 20+	300 - 20000	

5. PODSUMOWANIE

Elektrownie pompowe stanowią około 99% magazynów energii na świecie, ich moc przekracza 100 GW, a całkowita moc wszystkich pozostałych magazynów energii nie przekracza 1 GW. Sprawność magazynowania (70÷73)% a koszt magazynowania (5÷100) USD/MWh.

Magazynowanie energii za pomocą sprężonego powietrza CAES (ang. *Compressed Air Energy Storage*) stosowane jest jako alternatywa dla elektrowni pompowych. Energia elektryczna o niskim koszcie, dostępna w nocy i w weekendy, wykorzystywana jest do sprężania powietrza do około 7 MPa w wielkich, podziemnych zbiornikach. Sprężone powietrze z magazynu umożliwia eliminację sprężarki powietrza wlotowego, która do napędu zużywa ok. 60% energii mechanicznej produkowanej przez turbinę. W ten sposób prawie cała energia mechaniczna turbiny gazowej jest używana do napędu generatora elektrycznego. Efektywność odzyskiwania energii w układach CAES jest rzędu (70÷89)%. Koszty magazynowania energii (2÷120) USD/MWh.

Ochładzając powietrze do -195°C można je skroplić, dzięki czemu jego objętość spada tysiąc razy, a przechowywanie staje się znacznie prostsze niż przechowywanie sprężonego powietrza. W momencie zapotrzebowania na energię ciekłe powietrze można ogrzać, co spowoduje jego zamianę w gaz pod dużym ciśnieniem, który może napędzać turbospół gazowe generujące energię elektryczną. Konieczność ogrzewania ciekłego powietrza ciepłem ze spalania paliw kopalnych

sprawia, że proces jest mało efektywny energetycznie. Wykorzystanie ciepła odpadowego z elektrowni może podnieść jego efektywność do 90%, a koszty magazynowania energii wyniosą (260÷530) USD/MWh.

Wodór to czysty i bezpieczny nośnik energii, który może być wykorzystywany do przechowywania energii na dużą skalę. Można go wytwarzać z użyciem energii elektrycznej pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych oraz z ubogich w węgiel paliw kopalnych, a jego użycie nie powoduje żadnych emisji. Sprawność pozyskania i magazynowania wodoru (20 – 85)%, a koszty magazynowania (6 – 725) USD/MWh.

6. BIBLIOGRAFIA

1. European Commission. Energy Storage. A key technology for decentralized power, power quality and clean transport. Luxembourg 2001.
2. IEA. Technology Roadmap: Energy Storage. OECD, IEA (2014).
3. Wojciechowski H., Technologie wytwarzania oraz magazynowania energii elektrycznej i ciepła

w aspekcie bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju. Zadanie nr 5. PBZ-MEiN-1/2/2006. Wrocław 2008.

4. Wojciechowski H.: Magazynowanie energii. Ochrona atmosfery przez zmianę źródła energii. Dln Klub Ekologiczny, Wrocław 2016, s. 103-134.
5. Namysłowska-Wilczyńska B., Wilczyński A., Wojciechowski H.: Możliwości wykorzystania zasobów wodnych i energetycznych w podziemnych kopalniach surowców mineralnych. Wyd. IGSMIE PAN nr 95, Kraków 2016, s. 47-57.
6. Parau, E.; Zillmann, A.; Niemann. A.; Realisierungskonzept für die Nutzung von Anlagen des Universität Duisburg-Essen: Steinkohlebergbau als unterirdische – Pumpenspeicher-kraftwerke -Übersicht und geotechnische Aspekte Bergbau, nr 11/2014, s. 491-497.
7. Mirek P., Technika magazynowania energii w cieplym powietrzu. Energy Policy Journal 2016. Tom 19, Zeszyt 1.str.73 – 86

ENERGY STORAGE IN A LIQUEFIED AIR - A DREAM OR A NECESSITY?

The use of dispersed sources of renewable energy, has a growing share in the national energy balance. Production of electricity from wind power, solar or water depends on climatic conditions. Changes in this production are most often stochastic and hinder current balancing demand and supply of electricity. For this reason, that the number of renewable sources of energy constantly growing, there is the problem of their integration with the power system. For the current balance of supply and demand it becomes necessary to store electricity in distributed storage systems. In the case of such storages there are no restrictions as to the location, and the storage efficiency reaches the (60÷70)%. The paper will be presented technical-economic comparative analysis of pumping plant and storage of energy in a liquefied air (Liqued Air Energy Storage - LAES).

Key words: renewable energy sources, electricity storage, power pump plant, energy storage of liquefied.