

Bogdan Płaneta, Katarzyna Sobótka

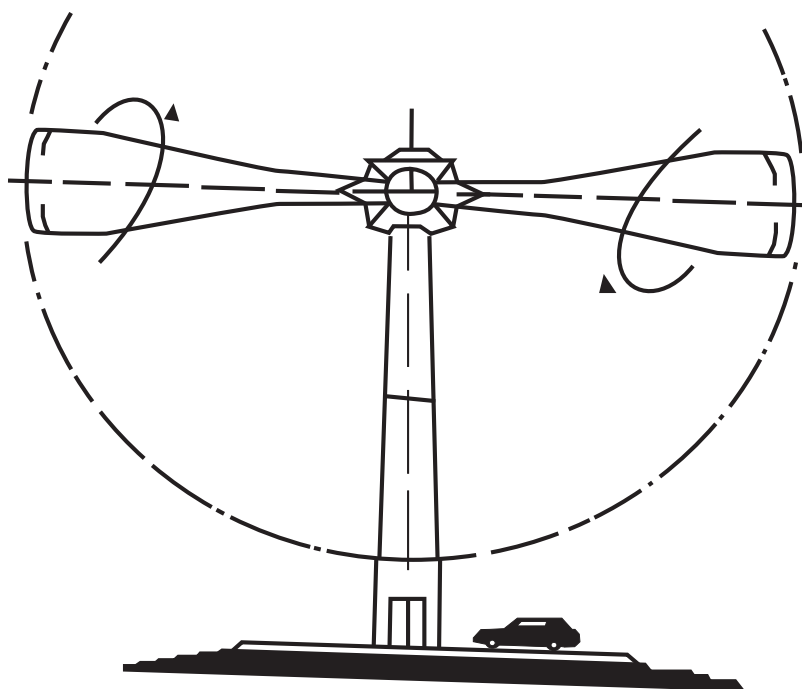
Magazynowanie lub komplementarne wykorzystywanie ENERGII ELEKTROWNI WIATROWYCH

W związku z problemem zmiennej siły wiatru rodzi się pokusa, aby energię uzyskaną w okresach wietrznych przechowywać do wykorzystania w okresach bezwietrznych. Niestety magazynowanie energii przy pomocy znanych nam technologii jest stosunkowo drogie. Sięganie po magazynowanie energii uzyskanej z niespokojnych źródeł odnawialnych, poza stosowaniem magazynowania energii w potencjale wodnym, powinno mieć miejsce tylko, gdy nie ma innych możliwości.

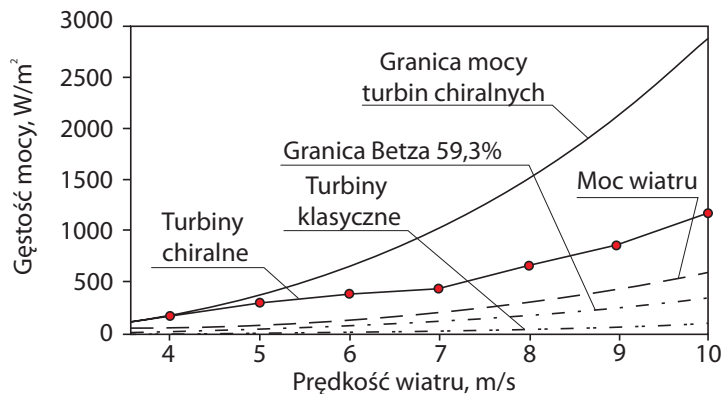
powszechne zastosowanie wodorowych ogniw paliwowych do magazynowania energii wiatrowej wydaje się mało prawdopodobne. Jeżeli jednak chcielibyśmy wykorzystać wielkie zasoby energetyczne wietrznych obszarów oceanicznych, to magazynowanie energii wiatrowej poprzez elektrolityczną produkcję wodoru może okazać się najlepszym rozwiązaniem.

Przy rozwiązywaniu problemu nierównomierności mocy wiatru w czasie dla sieci dużej skali należy przede wszystkim sięgać po sposoby bieżącego wykorzystania nadwyżek energii wiatrowej.

Podstawowym rozwiązaniem problemu nierównomierności mocy wiatru powinno być wykorzystanie tzw. efektu wygładzania. Na odpowiednio dużym obszarze wiatr wieje zawsze, dlatego wystarczy przesyłać energię z obszarów, gdzie wiatr wieje odpowiednio mocno do tych, w których akurat wieje za słabo. Rozwiązanie to łącznie z wykorzystywaniem magazynowania energii w potencjale wodnym zostało przyjęte za modelowe w większości planowanych i obecnie stosowanych systemów energetycznych z dużym udziałem energetyki wiatrowej. Oczywiście wykorzystanie efektu wygładzania wymaga użycia sieci energetycznej o od-



Rys. 1. Idea pracy turbiny chiralnej, źródło: [2]



Rys. 2. Granice mocy turbin klasycznych, a granice mocy turbin chiralnych, źródło: [2]

powiedniej przepustowości, a przy podejmowaniu decyzji o transferowaniu energii pomiędzy odległymi obszarami, należy uwzględnić straty przesyłu.

Z analizy przeprowadzonej przez Gregora Czischa i Bernharda Ernsta [1] wynika, że inwestorom niemieckim opłacałoby się budować elektrownie wiatrowe w Maroku i transferować energię do siebie. Pomysł ten wpisuje się w ideę sięgania do efektywnych źródeł energii odnawialnej położonych poza naszym kontynentem, po energię słoneczną z Sahary, wiatr z Arktyki, rośliny energetyczne z ciepłych stref klimatycznych. Straty przy przesyłaniu energii przy zastosowaniu transmisji HVDC (High Voltage Direct Current) wynoszą ok. 3%/1000 km. Straty przy przechowywaniu energii przy pomocy hydroelektrowni szczytowych wynoszą ok. 10-30%, co może odpowiadać stratom przy transferowaniu energii z Europy do Indii lub Chin.

Celem zasadniczym ewentualnej dalekosiężnej rozbudowy sieci energetycznych mogłoby być zbilansowanie szczytów energetycznych w odległych krajach i uzyskanie dużych oszczędności wynikających z lepszego wykorzystania mocy wszystkich elektrowni, w tym elektrowni wiatrowych.

Dla obszarów o słabych warunkach wietrznych istnieją dodatkowe metody ograniczania skutków nierównomierności produkcji energii z wiatraków, bez jej bezpośredniego magazynowania. Dotyczy to między innymi Polski, gdzie przeciętne okresy ciszy wiatrowych, w miejscach uchodzących za dobre dla budowy elektrowni wiatrowych, mogą wynieść aż 180 dni w roku a wskaźniki wykorzystania elektrowni wiatrowych mieszczą się w przedziale 7-26% czasu.

W wykorzystywaniu słabych wiatrów stosuje się odpowiednie turbiny o osiach pionowych oraz turbiny chiralne wykorzystujące efekt Magnusa (efekt ten umożliwia uzyskanie bramki z rzutu różnego podczas meczu piłkarskiego). Wg profesora Andrzeja Flagi [2] w zakresie słabych wiatrów (3-6 m/s) turbiny chiralne mogą generować 10-45 razy więcej energii niż turbiny klasyczne.

Oba wyżej wymienione rodzaje turbin mają również zalety ekologiczne, ponieważ obracają się dużo wolniej niż klasyczne, zatem powinny być cichsze i bezpieczniejsze dla ludzi i ptaków.

Z punktu widzenia rozwiązywania problemu nierównomierności mocy wiatru w Polsce elektrownie wiatrowe należy sytuować na morzu. Wg opracowania wykonanego dla Europejskiej Wspólnoty Energii Odnawialnej ERENE [5], koszty energii uzyskiwanych z elektrowni morskich i lądowych nie różnią się bardzo. Ze względu na słabe warunki wiatrowe koszty produkcji lądowych elektrowni wiatrowych w Polsce będą raczej należały do najwyższych.

Dobrym, chociaż tylko częściowym rozwiązaniem problemu wynikającego z nierównomierności mocy wiatru w czasie, będzie wykorzystanie zalet sieci inteli-

gentnych. Pewne odbiorniki mogą być włączane jeżeli istnieje nadwyżka mocy wyprodukowana przez turbiny wiatrowe. Istnieje szereg energochłonnych procesów produkcyjnych lub użytkowych, które opłaca się przerwać (lub zmniejszyć produkcję) i poczekać na kolejną porcję taniej energii. Do takich procesów może należeć galwanizacja, pompowanie wody do celów spożywczych, pompowanie wód termalnych, ogrzewanie wody lub pomieszczeń.

Także w rolnictwie istnieją możliwości wykorzystania ewentualnych nadmiarów energii pochodzącej z wiatraków: do nawadniania lub oświetlania upraw.

Jeszcze innym rozwiązaniem powyższego problemu jest stosowanie elektrowni hybrydowych, w których w okresach braku wiatru włącza się część elektrowni oparta na źródle spokojnym. Praktycznie stosuje się układy wiatr-diesel, wykorzystujące olej napędowy. W bardziej ekologicznej wersji tego układu zamiast oleju napędowego można by zastosować biopaliwa, biogaz, moc elektrowni geotermalnych, małych elektrowni wodnych, itp.

■ Sposoby gromadzenia energii

Do magazynowania energii wiatrowej można wykorzystywać stosowane obecnie sposoby gromadzenia energii po wprowadzeniu modyfikacji.

Energia dla potrzeb gospodarczych jest gromadzona w różny sposób, w postaci sprężonego powietrza, wyprodukowanego gazu przechowywanego w zbiornikach, ciepła w zbiornikach ciepłej wody, energii chemicznej akumulatorów, wyprodukowanych paliw.

W wielu wypadkach, aby uzyskać „magazyny energii”, wystarczy tylko dodatkowo zainwestować w większe zbiorniki, urządzenia o większej mocy i dodatkowe urządzenia elektryczne. Takie zmodyfikowane układy mogłyby korzystać z tańszej energii z sieci lub być zasilane z własnych wiatraków. W tym pierwszym przypadku jed-

Tab. 1. Zestawienie cech najczęściej stosowanych urządzeń magazynowania energii, źródło: na podstawie [6]

Urządzenie gromadzenia energii	Moc [MW]	Czas rozładowania	Sprawność [%]	Czas życia	Koszt inwestycyjny [USD/kW]
Elektrownia szczytowa na sprężone powietrze + turbina gazowa (CAES) wykorzystujące podziemne zagłębienia	15 - 400	2 - 24 godz.	54 - 88	35 lat	600 - 750
Elektrownia szczytowo-pompowa	250 -> 1000	12 godz.	87	30 lat	2700 - 3300 modernizacja ok. 300
Akumulator litowo-jonowy	5	15 min. do kilku godz.	90 (DC)	15 lat	4000 - 5000
Akumulator kwasowo-ołowiowy	3 - 20	10 sek. do kilku godz.	75 - 80 (DC) 70 - 75 (AC)	4 - 8 lat	1740 - 2580
Akumulator sodowo-siarkowy	35	8 godz.	80 - 85 (DC)	15 lat	1850 - 2150
Akumulator przepływowy VRB	4	4 - 8 godz.	75 - 80 (DC) 63 - 68 (AC)	10 lat	7000 - 8200
Akumulator przepływowy cynkowo-bromowy	0,04 - 0,12	2 - 4 godz.	75 - 80 (DC) 60 - 70 (AC)	20 lat	5100 - 5600
Dyski wirujące dużej mocy	0,75 - 1,65	15 sek. - 15 min.	93	20 lat	3695 - 4313
Akumulatory przepływowe żelazowo-chromowe	<10	2 - 4 godz.	50 - 65	20 lat	200 - 2500
Akumulatory cynkowo-powietrzne	0,02 - 10	3 - 4 godz.	40 - 60	kilka tysięcy cykli	3000 - 5000
Cewki nadprzewodzące	1 - 200	1 sek. - 10 godz.	90	>30 000 cykli	380 - 2000
Kondensatory elektrolityczne	10	od 30 sek.	90	> 500 000 cykli	1500 - 2500

nak dla ich skutecznego zastosowania konieczne jest zastosowanie rozwiązań sieci inteligentnej.

Jednym z takich sposobów może być produkcja gazu w zmodyfikowanej instalacji plazmo-gazyfikacji. Zbiornik na gaz musiałby być na tyle duży, aby zgromadzić gaz na okresy mało-wietrzne. Taka instalacja mogłaby służyć do generowania mocy w okresach szczytów energetycznych.

Również gromadzenie sprężonego powietrza dla potrzeb oczyszczania i przepompowywania ścieków jest potencjalnym sposobem magazynowania energii.

Przyszłościowym pomysłem jest wykorzystywanie energii wiatrowej do ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych. Jeżeli w ciągu najbliższych kilkadziesiąt lat rzeczywiście samochody elektryczne bardzo się rozpowszechnią,

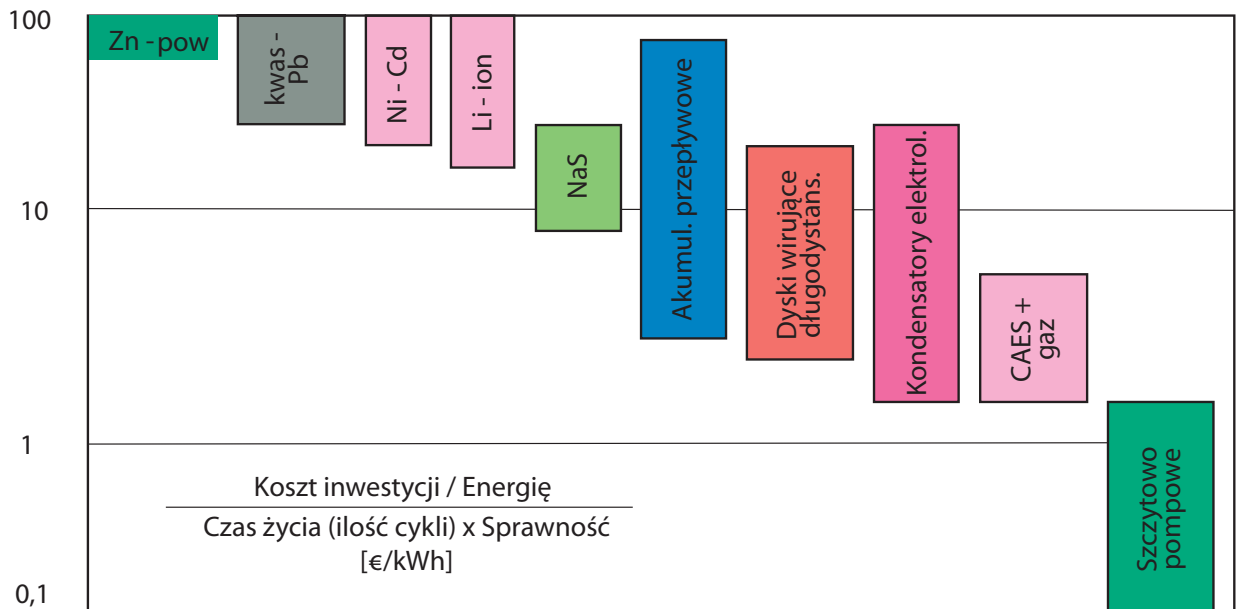
to będzie potrzebna bardzo duża ilość energii elektrycznej do ich ładowania. Oznacza to możliwość magazynowania poważnych ilości energii. Przy dobrej organizacji systemu ładowania akumulatorów samochodów elektrycznych możliwe będzie znaczące zmniejszenie problemu nierównomierności produkcji energii z wiatru.

■ Gdzie jest potrzebne magazynowanie energii z wiatru?

Magazynowanie energii wiatrowej będzie jednak potrzebne wszędzie tam, gdzie nie będzie możliwe zastosowanie tańszych sposobów bilansowania mocy elektrowni wiatrowych.

Dla sieci energetycznej dużej skali opartej w znacznym stopniu na energetyce wiatrowej, nagłe nieprzewidziane zmiany mocy elektrowni wiatrowych wywołują potrzeby, których nie będzie można zaspokoić zmianami mocy rezerwowych lub udziałem hydroelektrowni ze względu na zbyt wolną reakcję tych systemów. Jeżeli ze względów ekologicznych odrzucilibyśmy bilansowanie mocy elektrowni wiatrowych przy pomocy rezerw mocy elektrowni ciepłych, to okaże się, że potencjał elektrowni wodnych w wielu przypadkach będzie niewystarczający. Zawodne może też być szybkie transferowanie energii z odległych obszarów. Magazynowanie energii wiatrowej (lub pochodzącej z innych zmiennych źródeł) będzie szczególnie potrzebne dla użytkowników wykorzystujących własne instalacje produkcji energii. Należy zauważyć, że opłacalność korzystania z własnego prądu, nie obciążonego kosztami emisji gazów cieplarnianych, znacząco zwiększy





Rys. 3. Opłacalność zastosowania poszczególnych metod magazynowania energii wyznaczona przy pomocy wskaźnika, źródło: na podstawie [10]

szy się w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat. Magazynowanie energii może także stanowić ważną opcję, gdy nie ma możliwości przekazywania energii wiatrowej do sieci energetycznej.

Urządzenia do magazynowania energii ze względu na wykorzystywane zjawiska fizyczne lub chemiczne, możemy podzielić na: elektrochemiczne - akumulatory i akumulatory przepływowe, elektrostatyczne - kondensatory elektrolityczne, magnetyczne - cewki nadprzewodzące (SMES), urządzenia produkujące i magazynujące wodór, wykorzystujące energię sprężonego powietrza (CAES) i wykorzystujące energię potencjalną wody.

Najważniejszymi cechami urządzeń do magazynowania energii wiatrowej są: wysoka sprawność i niskie koszty gromadzenia energii, a dla potrzeb nagłego wsparcia systemu - możliwość szybkiego włączenia ich do pracy. Dla tych ostatnich zastosowań nie nadają się hydroelektrownie i CAES.

■ Sprężanie powietrza

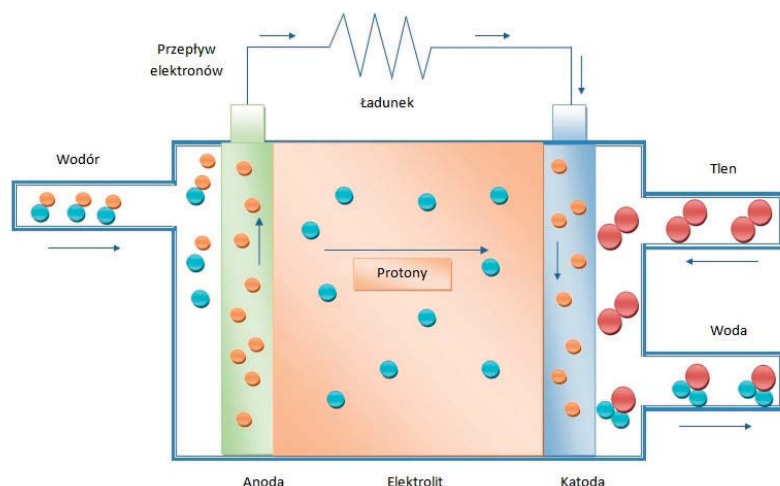
Gromadzenie energii wiatrowej w sprężonym powietrzu należy do najbardziej obiecujących metod. W warunkach laboratoryjnych sprężanie i rozprężanie powietrza przy zachowaniu warunków przemiany izotermicznej albo adiabatycznej można wykonać ze sprawnością bliską 100%. W warunkach komercyjnych sprawność ta jest zdecydowanie mniejsza ze względu na to, że podczas sprężania urządzeniami dużej wydajności, powietrze znacznie się nagrzewa (nawet do 800°C), co powoduje straty związane z przenikaniem ciepła. Natomiast podczas pracy turbiny lub silnika tłokowego, wykorzystującego sprężone powietrze do napędu generatora, powietrze oziębia się, co powoduje dalsze straty energii. Należy dodać, że istnieje możliwość skonstruowania sprężarek i silników o dużej sprawności, w tym bezpośrednio wykorzystujących energię kinetyczną wiatraków, aczkolwiek ograniczeniem ich stosowania może być koszt.

W praktyce w elektrowniach szczytowych sprężone powietrze stosuje się do „doładowania” turbiny gazowej (tzw. CAES). Ok. 1/3 uzyskiwanej mocy pocho-

dzi ze spalania gazu, a 2/3 ze sprężonego powietrza. Do przechowywania sprężonego powietrza wykorzystuje się sztolnie lub jaskinie. Zaawansowane systemy CAES mają rozwinięte wymienniki ciepła i układy kondensacyjne dla zwiększenia sprawności.



Rys. 4. Ogniwo wodorowe typu PEM



Rys. 5. Schemat budowy ogniwa paliwowego

■ Nowe pomysły

Istnieją pomysły (np. dr. Filipowicza), aby układ zbliżony do CAES zastosować jako lokalne źródło mocy szczytowej w rejonach występowania elektrowni wiatrowych. W takim wypadku należałoby wybudować zbiorniki na sprężone powietrze. Zamiast gazu naturalnego można byłoby stosować biogaz. Ze względu na słabą jakość biogazu, można rozważyć opcję podgrzewania zbiorników zamiast spalania biogazu w turbinach. Do podgrzewania zbiorników ze sprężonym powietrzem można wykorzystać także inne źródła ciepła. Powietrze sprężone przy pomocy wiatraków może być użyte do napędu maszyn lub pojazdów. Wadą pojazdów wykorzystujących sprężone powietrze jest ich krótki zasięg spowodowany małą „wartością energetyczną” sprężonego powietrza w stosunku do jego ciężaru i objętości. Jednak użycie sprężonego powietrza do napędu pojazdów ma wielkie zalety ekologiczne. W przeciwieństwie do pojazdów elektrycznych, czas ładowania zbiornika pojazdów na sprężone powietrze jest krótki. Poza tym cały pojazd można wykonać z powszechnie dostępnych materiałów.

Istnieje możliwość lokalnego wykorzystywania pojazdów na sprężone powietrze w rejonach występowania wiatraków. Sprężone powietrze poza samochodami może być także użyte do napędu pojazdów szynowych, statków i maszyn rolniczych. Zwłaszcza te ostatnie mogłyby być „tankowane” z częstotliwością dostosowaną do potrzeb, z wiatraka położonego w pobliżu pola.

■ Magazynowanie energii wiatrowej przy pomocy produkcji wodoru

Nadmiar produkowanej z wiatru energii można magazynować również w postaci wodoru poprzez wykorzystanie procesu elektrolizy. Woda, pod wpływem przyłożonego zewnętrznego napięcia elektrycznego, rozkłada się na tlen i możliwą do wykorzystania energetycznie dwuatomową cząsteczkę wodoru. Proces elektrolizy jest dobrze znany i szeroko rozpowszechniony na skalę przemysłową, głównie tam, gdzie dostęp do tańszej energii elektrycznej jest nieograniczony, czyli np. na Islandii, w Brazylii, czy Kanadzie. Amerykański Departament Energii ustalił cel na 2.85\$ za kg wodoru wyprodukowanego w procesie elektrolizy.

Efektywne magazynowanie wodoru stwarza wiele problemów. Wodór może być magazynowany w postaci gazowej, płynnej lub stałej (związków chemicznych). Jednak każda z tych metod ma znaczące ograniczenia i na chwilę obecną nie ma efektywnej metody magazynowania wodoru ani pod względem wolumetrycznym, ani na jednostkę masy. Dodatkowo przenikanie wodoru przez materiały przewodzące do jego ubytku w czasie (średnio 1% ubytku dziennie) oraz tworzenia związków metali z wodorem powodujących korozję materiału.

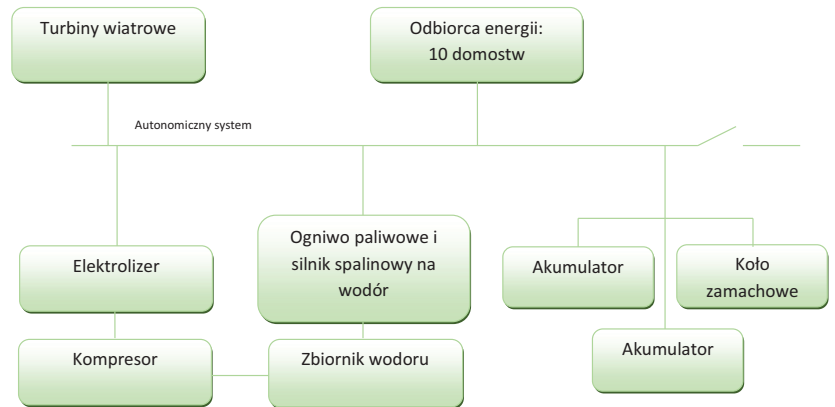
Między innymi z powyższych powodów transport wodoru jest droższy niż transport innych paliw. Bezpośrednie wykorzystanie wodoru do produkcji energii lub napędu pojazdów może odbywać się na dwa sposoby: poprzez spalanie, lub w ogniwach paliwowych. Zastosowanie wodoru w turbinach lub silnikach tłokowych nie wykorzystuje w pełni potencjału energetycznego. Rozwiązaniem bardziej efektywnym są ogniwa paliwowe, które bezpośrednio zamieniają energię chemiczną paliwa poprzez reakcje elektrochemiczne w energię elektryczną i ciepło. Głównym komponentem ogniwa paliwowych są katalitycznie aktywowane elektrody: anoda dla paliwa, katoda dla utleniacza i elektrolit, który przewodzi jony pomiędzy elektrodami. Zasada działania wszystkich typów ogniwa paliwowych jest taka sama, jednak wyróżnia się pięć głównych rodzajów w zależności od typu użytego elektrolitu, temperatury pracy czy rodzaju użytego silnika. Najbardziej rozpowszechnionym typem ogniwa są ogniwa bazujące na membranie tzw. PEMFC („Proton Exchange Membrane Fuel Cell”).

Zakres temperatur działania PEMFC określony na 60-80°C pozwala na szybkie uruchomienie, co ma wpływ na mniejsze zużycie materiałów, w rezultacie wydłużając trwałość i wytrzymałość urządzenia. Jednakże, do działania ogniwa paliwowego wymagane jest zastosowanie ka-

talizatorów, takich jak platyna, co znacząco podwyższa cenę urządzenia.

Przykładem wykorzystania technologii wodorowej do magazynowania zmieniającej się w czasie energii z wiatru jest instalacja zlokalizowana na norweskiej wyspie Utsira, z populacją 240 osób, leżąca na Oceanie Atlantyckim. Wyspa charakteryzuje się bardzo dobrymi warunkami wietrznymi, ale także małym (maksymalnie 900 kW) i zmiennym w czasie zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Główna produkcja energii jest dostarczana przez dwie turbiny wiatrowe o mocy 600 kW każda. W okresach nadprodukcji energii nadmiar jest dostarczany do elektrolizera (48 kW) produkując wodór z wydajnością 10 Nm³/godzinę, który następnie jest kompresowany do ciśnienia 200 bar i magazynowany w zbiorniku o pojemności 12 m³. W okresach niedoboru energii z wiatru, wodór wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej w 12 kW ogniwie paliwowym razem z 50 kW silnikiem spalinowym oraz akumulatorem jako system zapasowy. Dodatkowo w celu stabilizacji systemu wykorzystywane jest także koło zamachowe. Przy tych parametrach zmagazynowany wodór może dostarczyć energię dla całego systemu dziesięciu gospodarstw przez 2 dni. Podczas autonomicznego funkcjonowania systemu przez pół roku niezawodność systemu kształtowała się na poziomie 90%. Projekt ten pokazuje, że jest możliwe efektywne wykorzystanie nadmiaru energii z wiatru poprzez produkcję wodoru jako nośnika energii.

Pomimo dużych nadziei związanych z wykorzystywaniem ogniw paliwowych, opartych na ich wysokiej sprawności i neutralnym wpływem na środowisko, to rosnący koszt surowców tj. platyny, czy brak odpowiednich materiałów do efektywnego magazynowania wodoru, przekreśla możliwość, by w najbliższym czasie wodor i ogniwa paliwowe trafiły do codziennego użytku.



Rys. 6. Schemat sieci elektrycznej z rozproszonymi źródłami generowania i magazynowania energii

■ Przyszłość wodoru

W przyszłości szersze zastosowanie magazynowania energii wiatrowej w wodrze należy raczej upatrywać w wykorzystywaniu silnych wiatrów występujących na obszarach położonych daleko od sieci energetycznych. Z danych opublikowanych przez NREL wynika, że średnia gęstość mocy wiatru na wysokości 50 m dla północnej Polski, północno-zachodniej Danii i wietrznych rejonów północnego Atlantyku wynosi odpowiednio: 350, 800, 2 000 W/m².

Rodzi to pokusę wykorzystania silnych wiatrów przy pomocy elektrowni położonych na wyspach i elektrowni pływających nie połączonych z siecią energetyczną. Dla takich rozwiązań najlepszym środkiem magazynowania i przewożenia energii wiatrowej wydaje się wodór lub paliwa produkowane na bazie wodoru. □

■ Literatura

- [1] Czish G., Bernhard E.: *High wind power penetration by the systematic use of smoothing effects within huge catchment areas shown in a European example.*
- [2] Flaga A.: *Inżynieria wiatrowa.* 2008.
- [3] *Large scale integration of wind energy in the european power supply: analysis, issues and recommendations.* Raport stowarzyszenia EWEA.
- [4] Lubośny Z.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym.* 2009.
- [5] Mez L., Schreyer M.: *Studium wykonalności Tom 3 dla Europejskiej Wspólnoty Energii Odnawialnej ERENE.*
- [6] Shin-ichi I.: *Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids.* International Energy Agency.
- [7] Thorsteinn I.: *Planet Hydrogen - The Taming the proton,* Sigfusson, 2008.
- [8] S.A. Sherif, et al, *Wind energy and the hydrogen economy - review of technology,* Solar Energy, 2005.
- [9] <http://www.fuelcelltoday.com/>.
- [10] <http://www.elektrocitystorage.org/>.