



dr inż.

Krzysztof Rafał

Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2013 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Jego specjalizacją jest przetwarzanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych i magazynowanie energii w systemie elektroenergetycznym.

Pracuje w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w centrum badawczym Konwersja Energii i Źródła Odnawialne, w którym kieruje projektami związanymi z magazynowaniem energii.

krafal@imp.gda.pl



dr inż.

Paweł Grabowski

Ukończył studia magisterskie i doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Ma wieloletnie doświadczenie w zarządzaniu spółkami nowych technologii w kraju i za granicą.

Od 2014 roku jest intensywnie zaangażowany w rozwój rynku magazynowania energii w Polsce, jest inwestorem i założycielem Grupy STAY-ON. Jest też współzałożycielem Polskiego Stowarzyszenia Magazynowania Energii.

pawel.grabowski@stay-on.pl

MAGAZYNOWANIE ENERGII

Magazyny energii jako elastyczny zasób wszechstronnie wspierający pracę sieci będą niezbędne, gdy zabraknie pełniących dotąd funkcje regulacyjne elektrowni ciepłych.



KEZO

Krzysztof Rafał

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku

Paweł Grabowski

STAY-ON Energy Management w Puławach

Energia elektryczna staje się dominującym nośnikiem, dzięki któremu zaspokajamy coraz większą część swoich potrzeb energetycznych. Zawdzięcza to w dużej mierze sprawności przesyłu na duże odległości i łatwości przekształcania w inne

formy energii. Dzięki rozwojowi nowych technologii, takich jak pompy ciepła czy samochody elektryczne, prąd wkracza odważnie w kolejne sektory wykorzystania, zarezerwowane dotychczas dla paliw kopalnych.

Niezawodna dostawa energii elektrycznej do odbiorców końcowych wymaga ciągłej pracy sprawnie naoliwionej maszyny, jaką jest system elektroenergetyczny. Utrzymanie kluczowych dla pracy systemu parametrów poziomu napięcia i jego częstotliwości jest uzależnione od zachowania bilansu energetycznego, czyli równowagi między produkcją a zużyciem energii. Funkcjonujące przez wiele lat podejście do regulacji tego bilansu to regulacja mocy wyjściowej w elektrowniach wykorzystujących paliwa kopalne. Wadą tych rozwiązań jest nie tylko niepełne wykorzystanie ich potencjału produkcyjnego, lecz także spadek ich sprawności.

Konwersja Energii
i Źródła Odnawialne
Centrum Badawcze
Polskiej Akademii Nauk





DZIĘKI URZEMIOŚCI H2, INC. WWW.H2AEC.COM/ENG

Magazyn energii
w technologii przepływowej
o mocy 260 kW
i pojemności 2,2 MWh,
Jeonju, Korea Południowa

XXI wiek przyniósł nowe wyzwania związane z dynamicznym rozwojem źródeł energii odnawialnej (OZE). Coraz ambitniejsze cele klimatyczne przyjmowane na poziomie europejskim i światowym stymulują wzrost udziału źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych w produkcji energii elektrycznej. Tymczasem źródła te są stosunkowo kapryśne oraz zależne od pogody i sezonu, a ich zbilansowanie staje się coraz trudniejsze. W sukurs przychodzą tu oczywiście magazyny energii. Ich instalacja zwiększa elastyczność systemów przesyłowych i stwarza możliwości stabilnej pracy z dużym udziałem OZE. Oczywiście staje się, że nie sposób będzie wypełnić ambitnych celów klimatycznych bez zastosowania na wielką skalę magazynów energii.

Musimy pamiętać, że bilansowanie energii jest tylko jedną z wielu usług, które mogą zaoferować magazyny energii. Powodów do instalacji magazynu energii może być znacznie więcej, gdyż umożliwiają one:

- budowę mikrosystemów elektroenergetycznych (mikrosieci), zapewniających lokalne bilansowanie energii lub nawet całkowitą samowystarczalność,
- zapewnienie pracy autonomicznej (wyspowej) takich systemów, zapewnienie ciągłości zasilania w przypadku zaniku napięcia w sieci,
- zwiększenie możliwości przesyłowych obecnego systemu przez odciążenie linii, przez to zastąpienie kosztownych inwestycji w nowe linie lub źródła wytwórcze,
- poprawa parametrów jakościowych energii przez minimalizację wahań napięcia lub kompensację mocy biernej,
- rozruch systemu elektroenergetycznego po rozległych awariach (tzw. *black start*),
- wykorzystanie różnic cen energii do arbitrażu (tj. ładowania magazynu taną energią w godzinach pozaszczytowych i rozładowanie w godzinach szczytowych),
- minimalizację zapotrzebowania na moc szczytową, co przekłada się na obniżenie rachunków lub możliwość lepszego wykorzystania dostępnej mocy przyłączeniowej,
- świadczenie usług systemowych, jak regulacja częstotliwości czy rezerwa operacyjna.

Jak przechować energię?

Wyzwanie związane z magazynowaniem energii jest podejmowane od wielu lat. Pierwsze baterie wykorzystywano już we wczesnych latach XIX wieku, a pierwszy magazyn energii szczytowo-pompowy został uruchomiony w 1920 roku. Jednak dopiero pod koniec XX wieku, z chwilą pojawienia się istotnego zapotrzebowania na wyżej wymienione zastosowania, technologie magazynowania energii znacznie się rozwinęły.

Jest bardzo wiele metod magazynowania energii opierających się na wielu zjawiskach fizycznych bądź chemicznych. Najbardziej znane i obecnie stosowane to:

- ciśnieniowe – hydrauliczne szczytowo-pompowe, sprężone powietrze,
- mechaniczne – sprężynowe, kinetyczne, koła zamachowe,
- termiczne – zasobniki ciepła i chłodu,
- elektrochemiczne – akumulatory kwasowo-ołowiowe, litowo-jonowe, przepływowe i inne,
- elektryczne – kondensatory, superkondensatory, cewki nadprzewodzące,
- chemiczne – wodór, paliwa syntetyczne, biopaliwo i wiele innych.

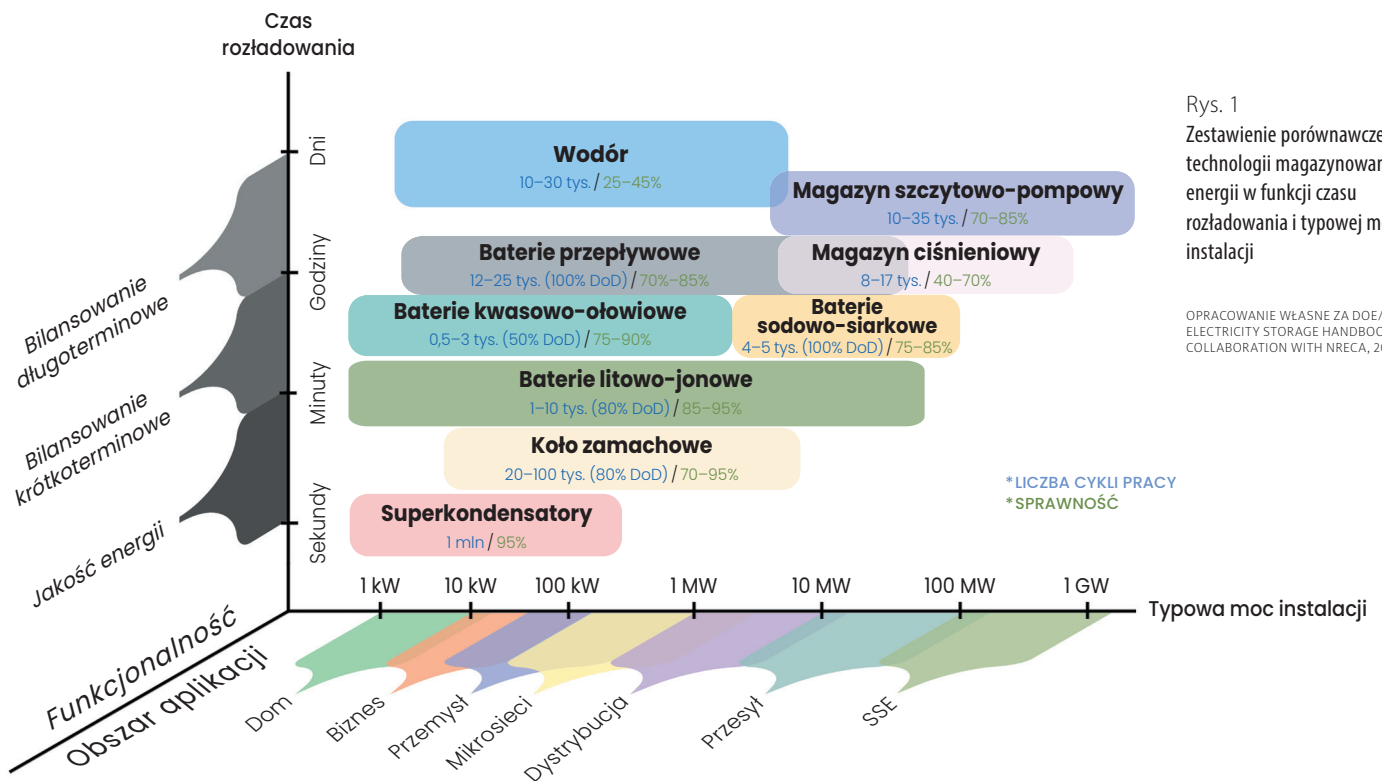
Każda z wymienionych technologii istotnie się różni, a najistotniejszymi parametrami użytkowymi są:

- dostępna moc i odporność na przeciążenie,
- pojemność użytkowa (zgromadzona energia),

Wanadowa bateria
przepływowa
w zabudowie kontenerowej
– widok na stopy ogniwi



KEZO



Rys. 1
Zestawienie porównawcze technologii magazynowania energii w funkcji czasu rozładowania i typowej mocy instalacji

OPRACOWANIE WŁASNE ZA DOE/EPRI
ELECTRICITY STORAGE HANDBOOK IN
COLLABORATION WITH NRECA, 2015

- sprawność całkowita cyklu ładowania i rozładowania systemu,
 - żywotność kalendarzowa i możliwa do osiągnięcia liczba cykli pracy,
 - koszt początkowy (CAPEX) i utrzymania (OPEX) systemu,
 - wskaźniki gęstości energii i mocy oraz związane z nimi masa i powierzchnia zabudowy,
 - bezpieczeństwo użytkowania, możliwość recyklingu,
 - warunki lokalizacyjne i klimatyczne, temperatura, możliwości rozbudowy.
- Uogólniając, magazyny energii można podzielić na:
- krótkoterminowe – superkondensatory, cewki nadprzewodzące, koła zamachowe,
 - dobowe – baterie elektrochemiczne, magazyny szczytowo-pompowe, sprężone powietrze itp.,
 - średnio- i długoterminowe – wodór, biopaliwa itp.

Zestawienie porównawcze technologii w funkcji czasu rozładowania do funkcji mocy jest przedstawione na rys. 1.

Ostateczny dobór magazynu energii jest uzależniony od zapotrzebowania użytkownika i parametrów eksploatacji oraz oczekiwanej funkcjonalności. Wśród czynników, które należy uwzględnić na etapie doboru rozwiązania, można wymienić: charakterystykę lub profile obciążenia, źródła zasilania i koszty energii (warunki przyłączenia do sieci, lokalne źródła energii), oczekiwaną dostępność do mocy i energii, dostępną przestrzeń i warunki środowiskowe, uwarunkowania prawne, bezpieczeństwo użytkowania, sposób finansowania i wiele innych.

Uwzględniając powyższe, magazyny elektrochemiczne – w tym również przepływowe – zyskują coraz więcej popularności, co jest związane z elastycznością konfiguracji, tj. niezależnym skalowaniem mocy i energii, łatwością dostępu do energii i relatywnie coraz niższą ceną za 1 kWh. Dlatego też dalsza część artykułu jest poświęcona głównie tej technologii.

Wszechobecne baterie

Postęp technologiczny i zapotrzebowanie społeczeństwa na tanie i łatwe magazynowanie energii, w szczególności elektrycznej, sprawiło, że w ciągu ostatnich lat pojawiła się na rynku bardzo duża liczba technologii bateryjnych.

Instalacja demonstracyjna hybrydowego magazynu energii w centrum badawczym KEZO Polskiej Akademii Nauk



ACADĒMIA BADANIA W TOKU Elektryczność

Technologia magazynowania energii wykorzystująca baterie elektrochemiczne jest wybierana zwykle ze względu na takie zalety, jak:

- konwersja energii w zakresie tej samej technologii – elektrochemia,
- uniwersalna, „wygodna” charakterystyka napięciowa,
- dostępność rynkowa,
- akceptowalne wymiary i elastyczność zabudowy – standardowe rozwiązania kontenerowe,
- coraz niższe koszty,
- dojrzałość technologii (tj. obecność na rynku).

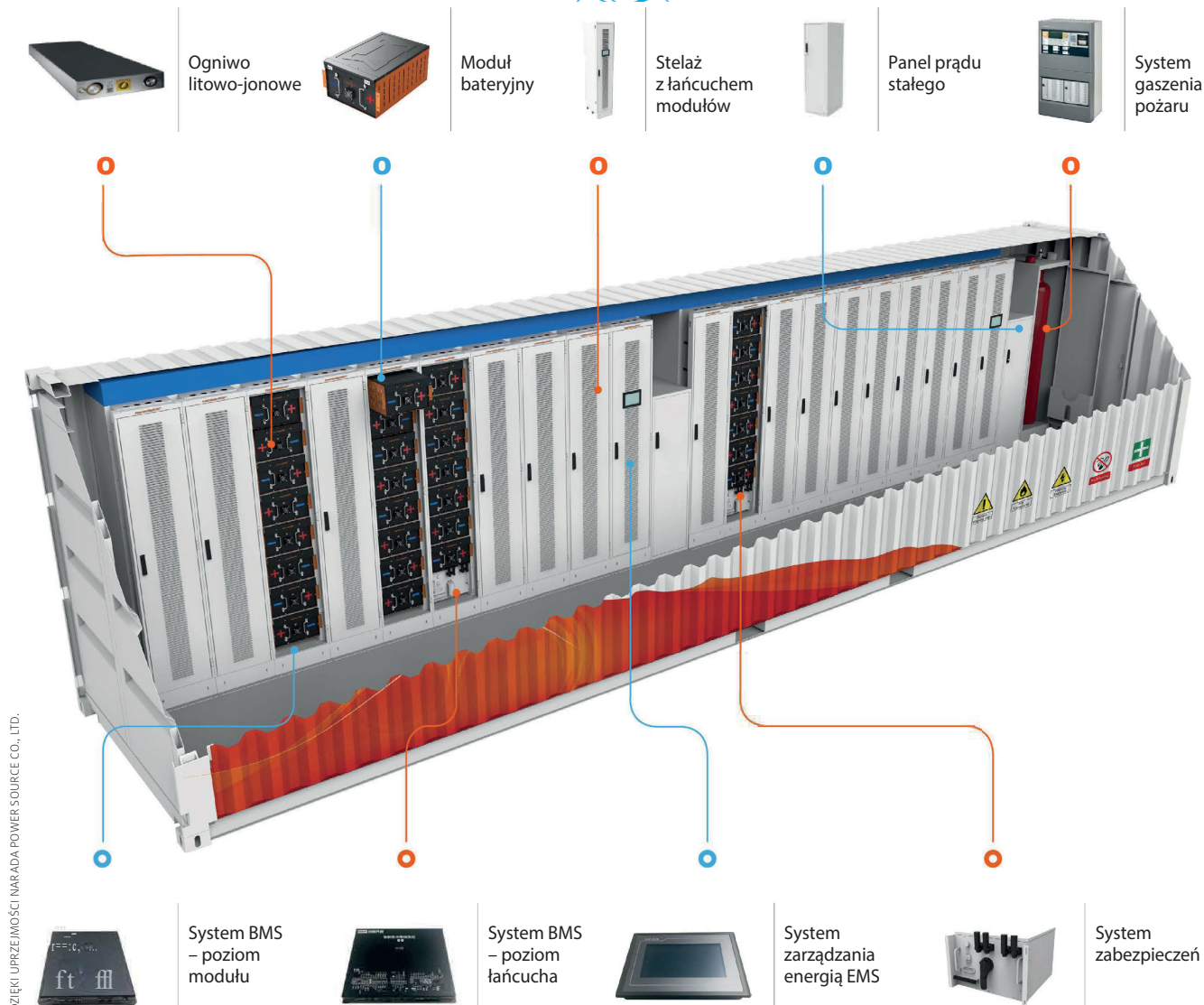
Kierując się kryterium dojrzałości technologii, dostępnością komercyjną i istniejącymi instalacjami wielkoskalowymi zwykle są wykorzystywane następujące technologie:

- litowo-jonowe: nikiel – mangan – kobalt (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide – NMC*),
- litowo-żelazowo-fosforanowe (*Lithium Iron Phosphate – LFP*),
- litowo-tytanowe (*Lithium Titanate Oxide – LTO*),
- przepływowe wanadowe (*Vanadium Redox Flow Battery – VRFB*),
- kwasowo-ołowiowe (*Lead Acid Battery – LAB*).

Każda z tych grup wyróżnia się na tle innych pewnymi specyficznymi cechami predestynującymi ją do zastosowania w instalacjach określonego typu. Wiele innych perspektywicznych technologii jest obecnie opracowywanych w laboratoriach na całym świecie.

Każda z technologii ze swoimi cechami charakterystycznymi znajduje specyficzne obszary zasto-

Grupa	Typ	Zalety	Wady
Litowo-jonowe	NMC	<ul style="list-style-type: none"> • dojrzałość technologii • wielu dostawców ogniw i integratorów kompletnych systemów magazynowania energii • bardzo duża gęstość energii 	<ul style="list-style-type: none"> • technologia uważana za niebezpieczną (wymaga specjalnej uwagi w aspekcie bezpieczeństwa przeciwybuchowego i przeciwpożarowego) • relatywnie wysoka cena • ograniczenia w dostępności ze względu na priorytet rynkowy (najpierw elektromobilność) • kosztowny recykling • średnia liczba cykli eksploatacyjnych
Litowo-żelazowo-fosforanowe	LFP	<ul style="list-style-type: none"> • bezpieczna • relatywnie najtańsza z grupy litowych 	<ul style="list-style-type: none"> • kosztowny recykling • wymagany reżim głębokości rozładowania dla zachowania gwarancji • wysoki koszt eksploatacji dla aplikacji wysokocyklowych (>1 cyklu na dobę) ze względu na koszty wymiany zużytych baterii • degradacja • średnia liczba cykli eksploatacyjnych
Litowo-tytanowe	LTO	<ul style="list-style-type: none"> • duża żywotność ze względu na liczbę cykli • duży zakres głębokości rozładowania • bezpieczna • wysoka sprawność (bez uwzględnienia systemów wspomagających) 	<ul style="list-style-type: none"> • relatywnie wysoka cena • ograniczony zakres funkcjonalności ze względu na cenę • kosztowny recykling
Kwasowo-ołowiowe	LAB	<ul style="list-style-type: none"> • bardzo dojrzała, powszechnie dostępna • względnie tania, oferująca niski CAPEX • dojrzałość technologii recyklingowej 	<ul style="list-style-type: none"> • bardzo wysokie koszty użytkowania (OPEX) ze względu na bardzo małą liczbę cykli (częsta wymiana zużytych baterii) • silnie ograniczona funkcjonalność ze względu na szybką degradację przy głębokim rozładowaniu
Przepływowe	VRFB	<ul style="list-style-type: none"> • bardzo niski koszt eksploatacji • bezpieczeństwo – niewybuchowe, niepalne • pomijalna degradacja • nieograniczona liczba cykli • żywotność • skalowalność (niezależność mocy od pojemności) • pomijalne samorozładowanie (tj. bateria pozostawiona na dłużej w stanie naładowania nie traci swojego ładunku) • w 100 proc. recyklingowalna 	<ul style="list-style-type: none"> • nieliczne referencje ze względu na świeżość technologii • ze względu na relatywnie niską gęstość energii wymaga więcej miejsca na instalację • niskie prądy (czyli niski stosunek mocy do pojemności magazynu) ładowania i rozładowania ograniczają wybór funkcjonalności



sowań. Technologie litowe doskonale sprawdzają się w systemach wymagających dużej mocy chwilowych i szybkiej reakcji. Przykładem może być instalacja w niemieckim Cremzow o mocy 22 MW i pojemności 35 MWh. Służy przede wszystkim regulacji częstotliwości w sieci, świadcząc usługi na rynku tzw. regulacji pierwotnej.

Inne role w systemie przypadną technologiom o długim czasie pracy, takim jak baterie przepływowo. Przykładem niech będzie instalacja o mocy 260 kW i pojemności 2,2 MWh w południowokoreańskim mieście Jeonju. Zlokalizowana przy wytwórni papieru służy do arbitrażu – w nocy jest ładowana taną energią pozaszczytową, w dzień zasila maszyny papiernicze. Dodatkowe programy zachęt uruchomione w Korei premiuje takie wyrównywanie dobowej krzywej obciążenia, sprawiając, że magazyn energii jest dodatkowym źródłem przychodu.

Hybrydowy, czyli jaki?

Jak widać, magazyny energii mogą pełnić rozmaite funkcje. Wydaje się naturalne, że inwestycja w magazyn energii opłaca się najbardziej w przypadkach, gdy jedna instalacja będzie pełniła jednocześnie wie-

le funkcji, zapewniając kilka źródeł przychodu bądź oszczędności. Jednak jak do takiego przypadku dobrać właściwą technologię zapewniającą odpowiednią wszechstronność?

Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie magazynu hybrydowego, łączącego w jednej instalacji dwie lub więcej technologii magazynowania. Z założenia powinny być to technologie o komplementarnych właściwościach, np. jedna o wysokiej mocy chwilowej, druga o długim czasie podtrzymania.

Taka instalacja powstała np. w 2020 roku na farmie wiatrowej Bystra (gmina Pruszcz Gdański). Pracuje tam hybrydowy magazyn energii złożony z baterii litowo-jonowych o mocy 1 MW i baterii kwasowo-olowiowych o mocy 5 MW. Magazyn służy do stabilizacji produkcji energii z wiatru i do wsparcia lokalnej sieci przesyłowej. W tym wypadku technologie wchodzące w skład magazynu, łącznie z układem sterowania i przetwarzania energii, dostarczyli Japończycy.

Niezależnie prace nad hybrydowymi magazynami energii prowadzi zespół Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk. W centrum badawczym KEZO w Jabłonie pod Warszawą od 2018 roku pracuje demonstracyjna instalacja hybrydowego magazynu energii. System ma łączną moc 60 kW

Przekrój przez litowo-jonowy magazyn energii w zabudowie kontenerowej

i pojemność 180 kWh. Składają się na nią cztery technologie bateryjne:

- przepływowa wanadowa – 12 kW/100 kWh,
- litowo-żelazowo-fosforanowa – 24 kW/24 kWh,
- węglowo-ołowiowa – 12 kW/24 kWh,
- kwasowo-ołowiowa – 12 kW/32 kWh.

Hybrydowy magazyn energii wspiera wewnętrzną mikrościeć centrum badawczego, m.in. bilansując produkcję energii ze źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych oraz zużycie na potrzeby biur, laboratoriów, ładowania pojazdów elektrycznych i ogrzewania pompą ciepła. Technologie bateryjne pracujące w operacyjnych warunkach są jednocześnie obiektem badań. Na celowniku zespołu naukowego jest opracowanie

Nie sposób będzie wypełnić ambitnych celów klimatycznych bez zastosowania na wielką skalę magazynów energii.

metodologii doboru magazynu hybrydowego, która zapewni maksymalne korzyści inwestora dla zadanego trybu pracy przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej żywotności baterii składowych.

Zarządzanie energią

Rozwój rozproszonych, najczęściej odnawialnych źródeł energii i systemów magazynowania energii zmienia tradycyjny przepływ energii w systemach. W wielu przypadkach magazyn energii jest kluczowym elementem umożliwiającym powstanie klastra energii, mikrościeci czy lokalnego obszaru bilansowania. Te terminy są często stosowane zamiennie dla wydzielonych logicznie sekcji systemu, zapewniających maksymalną samowystarczalność energetyczną. Ich efektywna praca jest uzależniona nie tylko od samego istnienia źródeł i magazynów, lecz także od zastosowania odpowiednich metod ich sterowania.

We wszelkich mikrosystemach energetycznych kluczową warstwą są systemy zarządzania energią (ang. *EMS – Energy Management System*). EMS obejmuje swoim zakresem przede wszystkim monitoring i możliwość sterowania zasobami energetycznymi. Poza oczywistą funkcją zarządzania ładowaniem i rozładowaniem magazynu energii mogą zapewniać także możliwość regulacji sterowalnych obciążeń, ograniczania mocy OZE w przypadku jej nadwyżki, utrzymania optymalnych warunków pracy źródeł spalinyowych czy przy zastosowaniu tych technik zapewnienie pracy wyspowej (autonomicznej, bez podłączenia do systemu elektroenergetycznego).

Sprawa zarządzania magazynem energii komplikuje się w przypadku zastosowania hybrydowego magazynu energii, w którym przebiegi procesów ładowania i rozładowania należy dostosować indywidualnie do specyfiki każdej z baterii wchodzącej w skład systemu. Opracowania rozwiązania tego zagadnienia podjął się zespół KEZO w ramach projektu HyStore „System Zarządzania Hybrydowym Magazynem Energii”. Jego celem jest opracowanie systemu EMS przeznaczanego dla hybrydowych magazynów energii.

Magazyny wkraczają do Polski

Spoglądając na doświadczenia innych krajów, można stwierdzić, że integracja na wielką skalę magazynów energii stanowi drugą po OZE falę transformacji energetycznej.

Spośród dostępnych technologii największą uwagę opinii publicznej przykuwają dziś baterie litowo-jonowe. Obecnie jest jeszcze wiele technologii gotowych do zastosowania na wielką skalę, np. baterie przepływowe. Wydaje się, że jedyną przeszkodą w ich rozwoju jest brak pozytywnych przykładów wielkoskalowych instalacji (tj. o pojemności powyżej 100 MWh). Podobnie sprawa ma się z instalacjami hybrydowymi – mimo niewątpliwych zalet ich dobór, integracja i sterowanie są bardziej złożone, co może zniechęcać inwestorów.

Oczywiście istotnym czynnikiem jest także koszt utworzenia magazynu energii. Obecnie baterie są instalowane głównie w miejscach, w których stabilność sieci jest zagrożona, z powodzeniem zastępują także kosztowne inwestycje w rozbudowę infrastruktury sieciowej i wytwórczej. W niektórych krajach Europy, w których uwolniono rynek usług systemowych, magazyny bateryjne z powodzeniem zarabiają na regulacji częstotliwości. Koszty baterii obniżają się do uznawanej za przełomową granicy 100 dolarów za 1 kWh, która otworzy wiele modeli biznesowych związanych m.in. z arbitrażem cenowym i tworzeniem z udziałem OZE źródeł hybrydowych o dużym wskaźniku dostępności energii.

W Polsce ustawodawstwo dotyczące magazynów energii nie jest jeszcze w pełni rozwinięte i nie oferuje atrakcyjnych modeli biznesowych dla inwestorów. Podejmowane są za to pierwsze projekty pilotażowe związane z instalacją magazynów energii. Wśród nich można wymienić np. projekt spółki Energa Operator w Pucku demonstrujący możliwości lokalnego bilansowania energii z użyciem magazynów czy magazyn PGE w Rzepedzi (Podkarpacie) mający za zadanie wsparcie systemu dystrybucyjnego. W najbliższych latach obszar magazynowania energii może stać się źródłem ciekawych innowacji i wielu miejsc pracy w Polsce.

Projekt „System Zarządzania Hybrydowym Magazynem Energii” jest finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach X edycji programu Lider.

Chcesz wiedzieć więcej?

Kiciński J., Chaja P., *Climate Change, Human Impact and Green Energy Transformation*, 2021, <https://www.springer.com/in/book/9783030699321>.

WWF Polska, *Dostępne i przyszłe formy magazynowania energii*, www.wwf.pl/aktualnosci/raport-magazynowanie-energii.

World Energy Council, *Five Steps to Energy Storage*, https://www.worldenergy.org/Fassets/Fdownloads/FFive_steps_to_energy_storage_v301.pdf.

DOE/EPRI, *Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*, <https://prod.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/151002.pdf>.

System Zarządzania Hybrydowym Magazynem Energii, www.hystore.kezo.pl.