dr inż. Krzysztof Rafał[1)]
ORCID: 0000-0001-7502-9121
dr inż. Jacek Biskupski[1)*)]
ORCID: 0000-0002-6264-2442
dr inż. Patryk Chaja[1)]
ORCID: 0000-0003-1820-4514
mgr inż. Marcin Kuźmiński[2)]
ORCID: 0000-0002-1309-1304

Budowa hybrydowych magazynów energii – aspekty techniczne i bezpieczeństwo

Construction of Hybrid Energy Storage Systems – technical and safety aspects

DOI: 10.15199/33.2023.01.11

Streszczenie. W artykule opisano podstawowe zagadnienia dotyczące systemów magazynowania energii elektrycznej z wykorzystaniem różnych technologii baterii elektrochemicznych. Scharakteryzowano kluczowe dostępne technologie pod kątem ich właściwości użytkowych oraz bezpieczeństwa użytkowania. Szczegółowo scharakteryzowano aspekty bezpieczeństwa pożarowego magazynów opartych na technologii litowo-jonowej jako najbardziej popularnej technologii. Przedstawiono dyskusję wyników przeprowadzonych przez autorów doświadczeń z bateriami litowo-żelazowo-fosforanowymi.
Słowa kluczowe: magazyn energii; baterie litowo-jonowe; baterie przepływowe; bezpieczeństwo pożarowe.

Abstract. The paper describes fundamental aspects of the construction of energy storage systems using different battery technologies. Key technologies available on the market are characterized in terms of their functional properties and operational safety. Fire safety aspects are characterized in detail for the lithium-ion technology as the most common one. Tests with lithium-iron-phosphate batteries conducted by authors are discussed.

Keywords: energy storage system; lithium-ion battery; flow battery; fire safety.

Stosowanie magazynowania energii na dużą skalę jest postrzegane jako rozwiązanie prowadzące do powszechnej dekarbonizacji oraz uniezależnienia się od importu paliw kopalnych [1]. Wśród dostępnych technologii prym wiodą nadal elektrownie szczytowo-pompowe, ale systemy magazynowania energii elektrycznej w bateriach elektrochemicznych szybko zdobywają rynki. Każda technologia akumulatorów powinna być dostosowana do przewidywanego zastosowania, począwszy od krótkoterminowej stabilizacji systemu energetycznego wymagającej dużej mocy, po codzienne bilansowanie energii związane najczęściej z wyrównywaniem nadwyżek energii z małych i mikroinstalacji PV *(peak shaving)*.

Konwencjonalne podejście do budowy bateryjnych systemów magazynowania energii elektrycznej zakłada zastosowanie tylko jednej wybranej technologii dopasowanej do konkretnej funkcji. Hybrydowe systemy magazynowania energii (ang. HESS – *Hybrid Energy Storage System*), zawierające co najmniej dwa typy akumulatorów o cechach uzupełniających się, są postrzegane jako optymalne rozwiązanie [2], pozwalające na optymalizację wydajności magazynu energii w przypadku, gdy ma on pełnić kilka funkcji, zapewniając jednocześnie dużą elastyczność. Dla użytkownika oznacza to możliwość wydłużenia czasu życia oraz zwiększenia korzyści z instalacji magazynu BESS. Szczególnie mikrosieci stacjonarne wydają się korzystać z integracji HESS [3]. Ich rola może obejmować bilansowanie energii z OZE, poprawę jakości energii [4], czy pracę wyspową. Część badań przeprowadzono na instalacji demonstracyjnej hybrydowego magazynu energii działającego w Centrum Badawczym Polskiej Akademii Nauk (KEZO) w Jabłonnie. System jest częścią mikrosieci obejmującej źródła odnawialne, odbiorniki energii oraz stacje ładowania pojazdów. W ramach magazynu hybrydowego działają trzy wybrane dostępne na rynku technologie bateryjne: **przepływowa, litowo-jonowa i kwasowo-ołowiowa**.

Projektując i budując systemy magazynowania energii, należy świadomie podejść do kwestii związanych z wyborem konkretnej technologii i konsekwencjami wynikającymi z takiego wyboru. Każda z technologii charakteryzuje się bowiem unikatowymi cechami użytkowymi, wymaganiami dotyczącymi środowiska pracy oraz stwarza różne zagrożenia dla otoczenia.

Baterie elektrochemiczne

Budując system magazynowania energii, biorąc pod uwagę kryterium dostępności rynkowej, należy wyróżnić następujące technologie bateryjne [5]:

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

W tabeli zestawiono technologie wraz z zakresem najważniejszych cech użytkowych oraz wpływających na bezpieczeństwo pracy [6]. Wymieniono najważniejsze cechy wyróżniające każdą z technologii oraz typowe zastosowanie.

[1)] Polska Akademia Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych
[2)] Szkoła Główna Służby Pożarniczej
[*)] Adres do korespondencji: jbiskupski@imp.gda.pl

Zestawienie technologii bateryjnych stosowanych w magazynach energii
List of battery technologies used in energy storage

Technologia, typowe parametry	Kluczowe cechy	Zastosowanie
Litowo-jonowa-manganowa NMC Prąd roboczy: 1 – 3C Żywotność: 5000 cykli Gęstość energii: 150 – 220 Wh/kg Typowy czas pracy 1 – 2 h	bardzo duża gęstość energii, technologia uważana za niebezpieczną (relatywnie niski punkt ucieczki termicznej, gwałtowny proces palenia), relatywnie wysoka cena, degradacja zależna od głębokości rozładowania, ograniczenia w dostępności ze względu na priorytet rynkowy (najpierw elektromobilność)	pojazdy elektryczne, stacjonarne magazyny energii (domowe i przemysłowe) o dużej gęstości energii
Litowo-jonowa LFP Prąd roboczy: 0,5 – 2C Żywotność: 5000 cykli Gęstość energii: 120 – 140 Wh/kg Typowy czas pracy 1 – 4 h	bezpieczniejsza i mniej palna w porównaniu z NMC, relatywnie najtańsza z grupy litowych, degradacja zależna od głębokości rozładowania, wysoki koszt eksploatacji w przypadku aplikacji wysokocyklowych (>1 cyklu na dobę) ze względu na koszty wymiany zużytych baterii	stacjonarne magazyny energii (domowe i przemysłowe), w których priorytetem jest koszt, baterie telekomunikacyjne, systemy UPS, zasilacze telekomunikacyjne
Litowo-jonowa LTO Prąd roboczy: 3 – 10C Żywotność: 12 000 cykli Gęstość energii: 80 – 100 Wh/kg Typowy czas pracy 0,2 – 1 h	długa żywotność cykliczna, wysokie prądy robocze, duży zakres roboczy głębokości rozładowania, bezpieczniejsza w porównaniu z LFP, wysoka cena	pojazdy elektryczne o dużej liczbie cykli pracy (np. autobusy miejskie), specjalistyczne magazyny stacjonarne wysokiej mocy
Kwasowo-ołowiowa LAB Prąd roboczy: 0,2C Ładowanie, 1 C rozładowanie Żywotność: 1 000 cykli Gęstość energii: 50 Wh/kg Typowy czas pracy 1 – 10 h	wysokie koszty użytkowania ze względu na bardzo małą liczbę cykli (częsta wymiana zużytych baterii), mała odporność na głębokie rozładowanie – ograniczona funkcjonalność, preferencja pracy buforowej, rozładowanie prądem o wysokiej częstotliwości, a ładowanie o niskiej częstotliwości, konieczność regularnej konserwacji, konieczność zaprojektowania wentylacji (możliwość wydzielania wodoru podczas ładowania)	systemy UPS, zasilacze buforowe, stacjonarne magazyny energii o niskiej częstotliwości użytkowania
Przepływowa wanadowa VRFB Prąd roboczy: 0,25C Żywotność: 20 000 cykli Gęstość energii: 40 – 60 Wh/kg Typowy czas pracy 4 – 8 h	bezpieczeństwo (elektrolit to wodny roztwór – niewybuchowy i niepalny), wyjątkowo długa żywotność niezależna od głębokości rozładowania – niski koszt eksploatacji, brak degradacji elektrolitu i możliwość jego ponownego użycia – wysoka wartość rezydualna, prąd roboczy o niskiej częstotliwości ogranicza wybór funkcjonalności	stacjonarne magazyny energii (przemysłowe), głównie dedykowane do bilansowania energii w reżimie dobowym

Źródło: Opracowanie Autorów

Bezpieczeństwo pożarowe baterii

Z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego każdą technologie należy charakteryzować wg analizy reprezentatywnych scenariuszy pożarowych i ilościowej oceny różnych rozwiązań techniczno-organizacyjnych, z wykorzystaniem narzędzi i metod inżynieryjnych i w odniesieniu do wcześniej sformułowanych celów [7]. Takie podejście identyfikuje trzy składowe inżynierskiego projektowania w ochronie przeciwpożarowej, którymi są:

1) opis oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa w analizowanym obiekcie w przypadku wystąpienia pożaru;

2) identyfikacja założeń projektowych dotyczących parametrów analizowanego obiektu, pożarów projektowych i warunków ewakuacji;

3) analizy inżynieryjne proponowanych rozwiązań i ocena, które z nich zapewniają oczekiwany poziom bezpieczeństwa.

Na podstawie przedstawionych składowych powinny być wyznaczane kryteria doboru takich środków biernej i czynnej ochrony przeciwpożarowej budynku, które zapewnią satysfakcjonujący poziom bezpieczeństwa użytkowania obiektu. Jest on ustalany indywidualnie w przypadku każdej większej instalacji zarówno baterii hybrydowych, jak i innej technologii.

Przez pojęcie **ochrony czynnej** rozumiemy rozwiązania pozwalające na jak najszybsze wykrycie ewentualnego pożaru, zasygnalizowanie niebezpieczeństwa i jego usunięcie, o ile jest to możliwe. Należą do niej urządzenia służące wykrywaniu i sygnalizacji zagrożenia. Są to systemy sygnalizacji pożarowej, wyposażone w czujniki dymu oraz wysokiej temperatury, systemy oddymiania oraz instalacje gaśnicze, zazwyczaj wodne lub gazowe.

W przypadku baterii litowo-jonowych dowiedziono, że pierwszą fazą sygnalizującą przyszłe zagrożenie jest intensywne wydobywanie się substancji lotnych z baterii (dymu z przegrzanego elektrolitu). Tak więc pierwszym elementem, o jaki należy zadbać w takich pomieszczeniach, są czujki dymowe – najbardziej sprawdzają się w tym przypadku czujki analizujące więcej niż jedno spektrum, np. czujki dwuczęstotliwościowe. Wykorzystują one np. niebieskie i podczerwone światło rozproszone do jednoczesnego wykrywania w powietrzu relatywnie małych i dużych cząstek stałych, choć nie mają możliwości wykrywania gazów, ale nie jest to konieczne. Kombinacja niebieskiego i podczerwonego światła rozproszonego pozwala na wykrywanie cząstek o wielkości od 0,001 do 1 μm oraz cząstek stałych o wielkości większej od 1 μm, co powoduje skuteczne i szybkie wykrywanie pojawiania się dymu w litowo-jonowych magazynach energii. Do ochrony czynnej można zaliczyć również wyposażenie obiektów w instalację hydrantową. Natomiast zadaniem ochrony biernej jest przeciwstawianie się rozwojowi ognia i rozprzestrzenianiu pożaru, a tym samym utrzymanie wysokiego stopnia bezpieczeństwa w budynkach. Poziom bezpieczeństwa powinny zapewniać konstrukcje budynków i wydzielonych pomieszczeń dzięki materiałom, z których zostały wykonane.

Bierna ochrona przeciwpożarowa jest wyrażana głównie przez odporność ogniową elementów budynku lub części instalacji (np. kanału oddymiającego). Głównymi czynnikami determinującymi poziom zastosowanej ochrony pomieszczeń z bateriami wszystkich typów będą wymagania wynikające z danej klasy odporności pożarowej budynków (A, B, C, D, E), które są ujęte w Prawie budowlanym [8 – 9] oraz Polskich Normach. W odniesieniu do wykorzystania magazynów energii na bazie baterii litowo-jonowych, niezależnie od tego, czy będą to magazyny jednorodne czy hybrydowe, w polskim porządku prawnym nie mamy jednoznacznych zapisów dotyczących technicznych wymagań budowlanych, jakie powinny spełniać. W związku z tym projektanci są zobligowani do zachowania standardów wynikających z ogólnego przeznaczenia obiektu. Połączenie funkcjonalne pomieszczenia, w którym prze-

widujemy magazyn, z resztą obiektu powoduje konieczność zastosowania określonego wydzielenia pożarowego zgodnie z art. 212 ust. 8. Przywołany tam ust. 4 odnosi się do przewidywanego obciążenia ogniowego występującego w pomieszczeniach. Określenie wskazanego parametru stanowi w przypadku magazynów energii nie lada wyzwanie, ze względu na ogromną dynamikę rozwoju technologicznego i brak jednoznacznych danych dotyczących wartości obciążenia ogniowego generowanego przez dany typ magazynów. Wynika to z faktu, że obecne przepisy skupiają się na charakterystyce pożarowej materiałów zgromadzonych w przestrzeni, nie uwzględniając energii, jaką te materiały/urządzenia mogą przechowywać.

Testy baterii litowo-jonowych

W praktyce najczęściej spotyka się instalacje na bazie ogniw litowo-jonowych. Przeprowadziliśmy testy baterii do zastosowania w przemyśle o pojemności nominalnej 5 kWh, składających się z piętnastu ogniw LFP. Najważniejszy wniosek, jaki płynie z przeprowadzonych testów, to **wymaganie wyposażenia magazynu energii w sprawnie działający BMS**. System ten jest kluczowym elementem bezpieczeństwa baterii zapobiegającym nieprawidłowej eksploatacji (przeciążenie, ładowanie prądem z nieodpowiednimi parametrami), która mogłaby skutkować przegrzaniem i niekontrolowaną ucieczką ciepła.

Testowane magazyny energii działające ze sprawnym BMS nie pozwalały na przeciążenie bądź przeładowanie baterii, a w konsekwencji na wywołanie sytuacji zagrożenia. Po ich rozebraniu i dokonaniu testów zwarcia, podpalenia oraz przekłucia samych ogniw wykazano jednak, że w pierwszej fazie degradacji wydobywa się z nich znaczna ilość dymów (gazów i areozoli), które są palne (choć nie dochodziło do ich samozapłonu). Jedynie próby bezpośredniego zapalenia palnikiem o mocy 35 kW spowodowały zapłon palnych części baterii wykonanych z tworzyw sztucznych i łatwy do ugaszenia pożar lokalny. Potwierdza to często spotykaną tezę o wyjątkowo dużej (jak na technologię litowo-jonową) odporności baterii LFP na bezpośrednie zapalenie się i nierozprzestrzenianie ognia.

Podsumowanie

Systemy magazynowania energii przeznaczone do przemysłu, telekomunikacji czy zastosowania w budynkach mieszkalnych będą coraz częściej pojawiały się jako infrastruktura istniejących i budowanych obiektów czy też samodzielne obiekty budowlane. Mogą one zawierać wiele technologii bateryjnych i tworzyć zróżnicowane zagrożenia. Projektując ich posadowienie, należy mieć na uwadze nie tylko aspekty użytkowe z punktu widzenia magazynowania energii, ale także wymagania dotyczące środowiska pracy (jak np. zakres temperaturowy implikujący wymagania dotyczące wentylacji i klimatyzacji) oraz bezpieczeństwa pożarowego (zastosowanie odpowiednich środków detekcji i gaszenia pożaru). Podobne zagadnienia będą dotyczyły projektowania garaży pod kątem przystosowania ich do parkowania pojazdów elektrycznych będących mobilnymi magazynami energii.

Obecnie prowadzone są **prace legislacyjne** mające na celu uregulowanie tego zagadnienia, co w dużym stopniu przyczyni się do zastosowania magazynów energii w budownictwie. Zanim jednak powstaną stosowne przepisy, wszystkim użytkownikom baterii litowo-jonowych i projektantom systemów magazynowania energii należy zalecić daleko idącą ostrożność. W niektórych krajach czy miastach (jak Londyn) już dziś funkcjonuje zakaz przewożenia elektrycznych hulajnóg windami i komunikacją miejską oraz przechowywania ich na niektórych podziemnych parkingach. Podobnie jak z autami zasilanymi gazami LPG i CNG, upłynie wiele czasu, kiedy rozróżnienie baterii litowych będzie wskazywało na te bardziej i mniej niebezpieczne. W okresie przejściowym, w przypadku małych i średnich instalacji, nie należy tworzyć wydzielonych stref ogniowych (szczególnie w przypadku urządzeń z bateriami w technologii LFP). Niezbędne jest zachowanie zdrowego rozsądku i przechowywanie bateri litowych (podobnie jak butli z gazem czy kanistrów z benzyną) z dala od pomieszczeń mieszkalnych i ładowanie ich (podobnie jak przelewanie gazu czy benzyny) poza pomieszczeniami zamkniętymi.

Naszym zdaniem problematykę zagrożenia baterii litowych zdecydowanie należałoby podzielić na małe, średnie i duże instalacje oraz osobno rozpatrywać problem pojazdów. Istotne jest zróżnicowanie wymagań stawianych magazynom energii ze względu na zastosowaną technologię bateryjną (a w przypadku grupy litowo-jonowej nawet subtechnologię), gdyż każda wymaga innego podejścia do projektu, eksploatacji i bezpieczeństwa przeciwpożarowego. Należy przede wszystkim pamiętać, że baterie litowo-jonowe posiadają alternatywę choćby w postaci wanadowych baterii przepływowych, które nie niosą ze sobą zagrożeń gwałtownego pożaru lub wybuchu [6].

Literatura

[1] European Association for Storage of Energy. Energy Storage Targets 20302050. Brussels, 2022.

[2] Hajiaghasi S, Salemnia A, Hamzeh M. Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. Journal of Energy Storage. 2019; 21: 543 – 570.

[3] Tahir Y, Nadeem MF, Ahmed A, Khan IA, Qamar F. A Review on Hybrid Energy Storage Systems in Microgrids. 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). 2020: 1 – 7.

[4] Rafał K, Biskupski J, Bykuć S, Chaja P. Dynamic Voltage Regulation and Unbalance Compensation in a Low-Voltage Distribution Network Using Energy Storage System. Applied Sciences. 2022; 12(22): 11678.

[5] Rafał K, Grabowski P. Magazynowanie energii. Academia – magazyn Polskiej Akademii Nauk. 2022; 1(65): 34 – 40.

[6] Energy Response Solutions Inc. Energy Storage System Safety: Comparing Vanadium Redox Flow and Lithium-Ion Based Systems. South Glastonbury, 2017.

[7] Brzezińska D. Powstanie i rozwój inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w Polsce. Safety and Fire Technology. 2016; 42 (2): 141 – 149.

[8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późn. zm.).

[9] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz.U. 2010.109.719 z późn. zm.).

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr LIDER/30/0166/L-10/18/NCBR/2019.

Przyjęto do druku: 27.09.2022 r.