



Europejski
Instytut Miedzi
Copper Alliance

Leonardo
ENERGY 

NOTA APLIKACYJNA AKUMULATOROWE SYSTEMY MAGAZYNOWANIA ENERGII: WYDAJNOŚĆ I OKRES EKSPLOATACJI.

Jurgen Timpert

Spis treści

Streszczenie.....	3
Wprowadzenie.....	4
Krótki przegląd typów ogniw.....	6
Czynniki wpływające na efektywność systemu magazynowania energii.....	14
Czynniki wpływające na okres eksploatacji systemu magazynowania energii.....	17
Zapewnianie odpowiedniego środowiska pracy.....	25
Wnioski.....	27
Wykaz źródeł.....	28
Załączniki.....	29

STRESZCZENIE

Niniejsza nota aplikacyjna opisuje techniczne aspekty konstrukcji i zasady działania akumulatorowych systemów magazynowania energii oraz ich wpływ na efektywność i okres eksploatacji tych systemów. Różne role systemów magazynowania energii elektrycznej opisano przede wszystkim w celu wyjaśnienia sposobu zastosowania tych systemów. Następnie przedyskutowano najczęściej stosowane technologie konstrukcji akumulatorów i mechanizmy ich starzenia się. Z uwagi na fakt, że transformatory i rozdzielnice są elementami bardzo ważnymi i także od nich zależy wydajność systemów magazynowania energii, omówiono tu również czynniki mające wpływ na efektywność i okres eksploatacji energoelektroniki.

Częstym czynnikiem mającym wpływ na okres eksploatacji zarówno akumulatorów, jak i elektroniki, jest ciepło: im wyższa temperatura, tym szybsze starzenie się komponentów. Straty energii wynikają przede wszystkim z wytwarzania ciepła. Dążenie do wysokiej efektywności energetycznej akumulatorów i energoelektroniki daje podwójną korzyść: poza oszczędnością energii obniżenie wytwarzania ciepła zmniejsza wymagania w stosunku do urządzeń chłodzących i przedłuża okres eksploatacji komponentów dzięki obniżeniu temperatury roboczej.

WPROWADZENIE

Cel magazynowania energii?

Każda sieć elektryczna — zarówno publiczna, jak i wewnętrzna odbiorcy energii — musi nieprzerwanie dbać o równowagę między podażą a zapotrzebowaniem na energię energetyczną. Nie zawsze jest to łatwe. Zapotrzebowania na energię elektryczną zawsze było zmienne, jednak zastosowanie odnawialnych źródeł energii spowodowało, że również pobór energii stał się bardziej zmienny i mniej przewidywalny niż w sieciach poprzedniej generacji. Systemy magazynowania energii mogą zaradzić tak skomplikowanemu bilansowaniu sieci.

Operatorzy sieci energetycznych używają systemów magazynowania energii w celu:

- **Uniknięcia potrzeby modernizacji urządzeń przesyłowych i dystrybucyjnych.** Na końcach linii przesyłowych lub dystrybucyjnych mogą występować problemy, ponieważ możliwość modernizacji sieci nie nadąza za tempem wzrostu liczby odbiorców. Prowadzi to do czasowych przeciążeń infrastruktury energetycznej. Aby zapobiec potrzebie natychmiastowych modernizacji, można zastosować system magazynowania energii w celu niwelacji szczytowych wartości obciążenia. Spowoduje to lepsze wykorzystanie dostępnej pojemności, a tym samym wydłuży żywotność połączeń elektrycznych.
- **Regulowania częstotliwości.** Energia dostarczana do sieci publicznej jest tradycyjnie wytwarzana przez generatory synchroniczne. Generatory napędzane są przez turbiny, które są regulowane w taki sposób, aby dostarczały energię mechaniczną niezbędną do utrzymania znamionowej prędkości obrotowej tych urządzeń. Pozwala to utrzymać stałą częstotliwość napięcia sieci. Elektroniczne źródła energii, takie jak falowniki fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe, nie oferują tego rodzaju regulacji częstotliwości. Co więcej, mogą powodować brak równowagi pomiędzy dostawą i zapotrzebowaniem, dostarczając do sieci zmienną moc i wywołując dodatkowe zachwiania częstotliwości. System magazynowania energii może służyć do wyrównywania tej zmienności i zapewniania prawidłowej regulacji częstotliwości.

Użytkownicy sieci energetycznych używają systemów magazynowania energii w celu:

- **Magazynowanie energii odnawialnej „poza licznikiem”.** W coraz większej liczbie krajów stopniowo rezygnuje się z taryf gwarantowanych w przypadku produkcji energii odnawialnej na miejscu. W rezultacie opłacalne stało się korzystanie z energii odnawialnej w miejscu jej wytworzenia. Domowy system zarządzania energią zaopatrzony w akumulator może znacznie zwiększyć stopień wykorzystania lokalnie wytworzonej energii odnawialnej. Akumulator jest ładowany, kiedy produkcja przewyższa zapotrzebowania na energię, i rozładowywany w sytuacji odwrotnej, gdy zapotrzebowanie na energię byłoby pokrywane z sieci publicznej. Szczegółowe informacje na temat systemów magazynowania energii „poza licznikiem” do celów integracji odnawialnych źródeł energii można znaleźć w odpowiedniej nocie aplikacyjnej projektu Leonardo Energy(10).
- **Niwelacji szczytowych wartości obciążenia.** W przypadku niwelacji szczytowych wartości obciążenia system magazynowania energii wspomaga sieć w okresach największego obciążenia i jest ładowany w czasie niższego zapotrzebowania na energię. Prowadzi to, na przykład, do lepszego wykorzystania wydajności agregatu przenośnego lub lepszego wykorzystania połączeń z siecią, co przekłada się na redukcję kosztów. W pewnych wypadkach obniżenie kosztów kompensuje koszt zakupu samego systemu.

- **Handlu energią.** Ładowanie systemu magazynowania energii w okresie niskich (a nawet ujemnych) cen chwilowych i rozładowywanie w okresach cen wysokich jest prostym mechanizmem generowania przychodów dzięki systemowi magazynowania energii. Niestety przychody generowane przez ten mechanizm rzadko kompensują koszty systemu magazynowania. Jeśli system magazynowania energii zostanie zainstalowany do innych celów i będzie mieć wystarczającą pojemność, mechanizm ten może nieco podwyższyć przychody w stosunku do zakontraktowanych usług.
- **Zasilania awaryjnego (UPS).** Jest to klasyczne zastosowanie akumulatorowego magazynowania energii. Zasilacze awaryjne służą do podtrzymania zasilania ważnych urządzeń podczas przerw lub niedoborów energii. Urządzenia UPS zasilane z akumulatora muszą zapewnić zasilanie zabezpieczanych urządzeń przez określony czas minimalny. Ten czas waha się od kilku minut do kilku godzin.

Typowe miary wydajności systemu magazynowania energii

Każdy system magazynowania energii podłączony do sieci można uznać za tak zwaną czarną skrzynkę z pewnymi miarami wydajności. Definicja miary wydajności jest taka sama dla każdego rodzaju systemu, bez względu na zawartość czarnej skrzynki, ale wartość systemu zależy tylko od jego konstrukcji i zastosowanej technologii. Poniższa tabela przedstawia minimalny zestaw charakterystyk akumulatorowego systemu magazynowania energii. Jest to część definicji zawartych w dokumencie GRIDSTOR RP (1). W odniesieniu do systemów magazynowania energii elektrycznej (9) stosowane są definicje zawarte w normie IEC 62933-1 CDV.

Termin	Definicja	Jednostka
System magazynowania energii elektrycznej System EES EESS	Instalacja zintegrowana z siecią energetyczną ze zdefiniowanym zakresem, zawierająca co najmniej jeden system EES, którego zadaniem jest pobór energii elektrycznej z systemu zasilania, magazynowanie tej energii wewnątrz, a następnie dostarczanie jej do systemu zasilania, którego wykonanie wymaga prac inżynierjno-budowlanych, urządzeń do przetwarzania energii oraz odpowiednich urządzeń dodatkowych. (9)	
Magazyn energii elektrycznej EES	Instalacja zdolna do poboru energii elektrycznej, magazynowania jej przez określony czas i wyzwolenia energii elektrycznej, do czego może być niezbędny proces przetwarzania energii. (9) Uwaga: System EES może być używany także do określania aktywności urządzenia opisanego w definicji podczas wykonywania jego funkcji.	
Kalendarzowy czas życia	Teoretyczny oczekiwany czas życia, jeśli system EES nie był wymieniany, spowodowany procesem degradacji EES.	lata
Pojemność	Ilość prądu elektrycznego o określonym natężeniu (lub profilu natężenia), którą może dostarczyć całkowicie naładowany akumulator EES od pełnego naładowania do całkowitego rozładowania.	Ah

Cykl	Cykl to okres ładowania/rozładowania akumulatora składający się z czterech kontrolowanych faz od początkowego stanu jego naładowania. Cykl składa się albo z ładowania, przerwy, rozładowania i przerwy, albo z rozładowania, przerwy, ładowania i następnej przerwy.	1
Czas życia w cyklach	Teoretycznie osiągalna liczba cykli, gdy ładowanie i rozładowywanie systemu EES odbywa się w pełnych równych cyklach.	1
Głębokość rozładowania (DoD)	Energia rozładowana z systemu EES podczas cyklu (fazy rozładowania) wyrażona jako procent pojemności nominalnej.	%
Wydajność	Energia dostarczona przez EES podzielona przez energię pobraną przez EES, wyrażona jako procent.	%
Pojemność energetyczna	Ilość energii elektrycznej o określonej mocy (lub profilu mocy), którą może dostarczyć całkowicie naładowany akumulator EES od pełnego naładowania do całkowitego rozładowania.	Wh

KRÓTKI PRZEGLĄD TYPÓW OGNIW

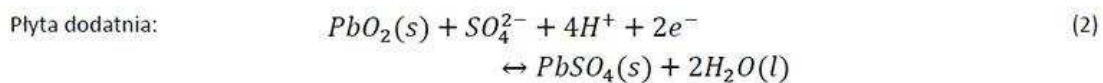
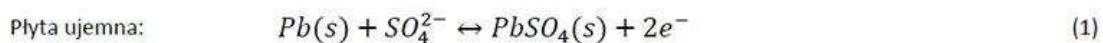
Ogniwa dzielą się przede wszystkim na pierwotne i wtórne. Ogniwa pierwotne (baterie) są całkowicie naładowane podczas produkcji i nie mogą być ponownie ładowane. Baterie odgrywają tylko pomocniczą rolę w systemach magazynowania energii, na przykład jako baterie podtrzymujące zegar komputera sterującego lub baterie zapasowe w czujnikach dymu czy miernikach energii. Ogniwa wtórne to akumulatory ładowalne, są więc jedynymi typami ogniw, które są wykorzystywane w systemach magazynowania energii.

Najczęstsze typy akumulatorów

Akumulatory kwasowo-ołowiowe

Akumulatory kwasowo-ołowiowe są od ponad wieku najczęściej stosowane w różnych systemach magazynowania energii i w tej roli były niemal bezkonkurencyjne do przełomu XX i XXI wieku, kiedy to dostępne stały się akumulatory litowo-jonowe. Choć akumulatory kwasowo-ołowiowe są najczęściej stosowane w zasilaczach UPS (z powodu relatywnie niskich kosztów w przeliczeniu na jednostkę magazynowanej energii i były w przeszłości także stosowane do wspomagania sieci), obecnie ich użycie jest dość ograniczone. Znany systemem był akumulator 17 MW/14 MWh BEWAG działający w Berlinie, który w latach 1987–1995 zapewniał regulację częstotliwości i rezerwę mocy w sieci, która nie miała wtedy połączenia z resztą Niemiec.

Choć istnieje wiele rodzajów akumulatorów ołowiowych (mokre, żelowe, AGM, Advanced Lead Acid) wszystkie wykorzystują tę samą parę reakcji chemicznych ładowania/rozładowania, które przedstawiono poniżej.



Podczas rozładowywania akumulatora kwasowo-ołowiowego reakcje przebiegają od strony lewej do strony prawej. Podczas ładowania kierunek reakcji jest odwrotny. Podczas rozładowywania ołów w płycie ujemnej jest utleniany ze stanu wolnego do stopnia utlenienia +2, tworząc siarczan ołowiu, natomiast ołów w płycie dodatniej jest redukowany ze stopnia utlenienia +4 do +2, przechodząc z ditlenku ołowiu w siarczan ołowiu. Podczas rozładowywania zużywany jest kwas siarkowy zawarty w elektrolicie. Choć nie wynika to wprost z powyższych reakcji, transport ładunku wewnątrz ogniwa (wewnętrzny transport ładunków) odbywa się przez transport jonów wodorowych w elektrolicie.

Reakcja przeładowania w akumulatorach kwasowo-ołowiowych polega na elektrolizie wody w elektrolicie. Prowadzi ona do (nieznacznej) utraty wody i przyspieszonej korozji płyty dodatniej spowodowanej wysokim stężeniem tlenu w ogniwie. Utratę wody można kompensować przez okresowe dolewanie do akumulatorów mokrych wody zdemineralizowanej lub, w zamkniętych akumulatorach zaworowych, przez cykl rekombinacji tlenu. W przypadku niezrównoważenia stanu naładowania w szeregu akumulatorów, można go skorygować przez podłączenie wydłużonego ładunku do szeregu. W ogniwach o wysokim stanie naładowania zajdzie reakcja przeładowania, a ogniwa niedoładowane naładują się.

Akumulatory kwasowo-ołowiowe korzystają ze sprawdzonej i dobrze opracowanej technologii. Konstrukcja, procesy i błędy w działaniu tych akumulatorów zostały doskonale poznane w ciągu 150 lat prac rozwojowych. Z tego powodu jest mało prawdopodobne, że w przyszłości nastąpią jakieś istotne zmiany w kwestii redukcji kosztów, gęstości energii czy czasu eksploatacji akumulatorów tego typu. Akumulatory kwasowo-ołowiowe są technologią EES dominującą w zasilaczach UPS. Na Rysunku 1 przedstawiono mały zespół składający się z 12 szczelnie zamkniętych ogniw. Ten zespół ma nominalne napięcie 24 V.



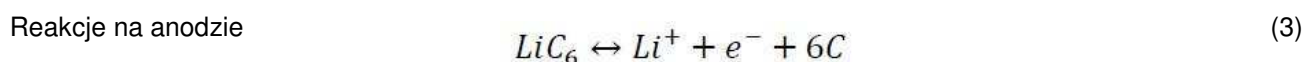
Rysunek 1 — Mały zespół szczelnie zamkniętych ogniw kwasowo-ołowiowych.

Istnieją również tak zwane zaawansowane akumulatory kwasowo-ołowiowe. Akumulatory te korzystają z nowoczesnych materiałów i technik konstrukcyjnych pozwalających rozwiązać wiele problemów typowych dla tradycyjnych akumulatorów kwasowo-ołowiowych, dzięki czemu mogą być stosowane tam, gdzie dotąd nie można było stosować tego typu akumulatorów. Wśród korzyści płynących z zastosowania technik, takich jak ramy stalowe, płytki karbonowe, płytki bipolarne itp., można wymienić lepszy cykl głębokiego ładowania i rozładowywania, krótszy czas natychmiastowego ładowania i rozładowywania oraz możliwość produkcji kompaktowych akumulatorów wysokonapięciowych. Jednak żadna z tych technologii nie znalazła większego odbioru rynkowego, nie będą one więc bardziej szczegółowo omawiane w niniejszej publikacji.

Akumulatory litowo-jonowe

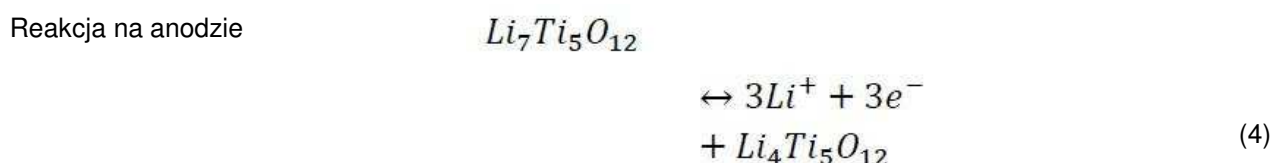
Nazwa akumulatory litowo-jonowe jest nieco myląca, ponieważ nie odnosi się do konkretnego typu akumulatora z dobrze zdefiniowaną parą reakcji ładowania/rozładowania, jak ma to miejsce w przypadku akumulatorów kwasowo-ołowiowych, ale raczej do całej klasy akumulatorów, które do wewnętrznego transportu ładunków wykorzystują jony litu. W konsekwencji akumulatory określane ogólnie jako Li-Ion mogą mieć bardzo zróżnicowane właściwości. Cechą, która łączy te akumulatory, jest to, że ich katoda — a najczęściej także anoda — działa na zasadzie interkalacji. Jony litu nie są wiązane chemicznie z żadną substancją, ale wnikają w pory materiału i przylegają do jego powierzchni. Zaprezentowano to graficznie na Rysunku 1. W efekcie do konstrukcji akumulatorów Li-ion nadają się najlepiej materiały o otwartej strukturze i bardzo dużej powierzchni. Doskonałym i tanim materiałem na anodę jest na przykład grafit — dzięki swojej porowatej strukturze.

Uproszczona reakcja interkalacji na anodzie na bazie węgla (grafit, węgiel aktywny lub nawet grafen) wyraża się następującym wzorem, rozładowanie od lewej do prawej:

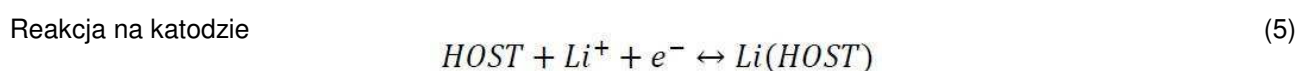


Choć powyższe równanie sugeruje, że związek litowo-węglowy jest tworzony podczas ładowania, w rzeczywistości tak nie jest. Ponieważ dodatnio naładowane jony litu są interkalowane wewnątrz struktury anody, węgiel musi zawierać dodatkowe elektrony, aby zachować obojętny ładunek całej anody. Podczas rozładowania, kiedy jony litu są uwalniane z anody, uwalniają się również dodatkowe elektrony zawarte w węglu w celu zachowania obojętnego ładunku anody. Ani węgiel, ani jony litu nie ulegają w tym czasie żadnym chemicznym przekształceniom.

Uproszczona reakcja na anodzie litowo-tytanicznej (LTO) wyraża się następującym wzorem, rozładowanie od lewej do prawej:



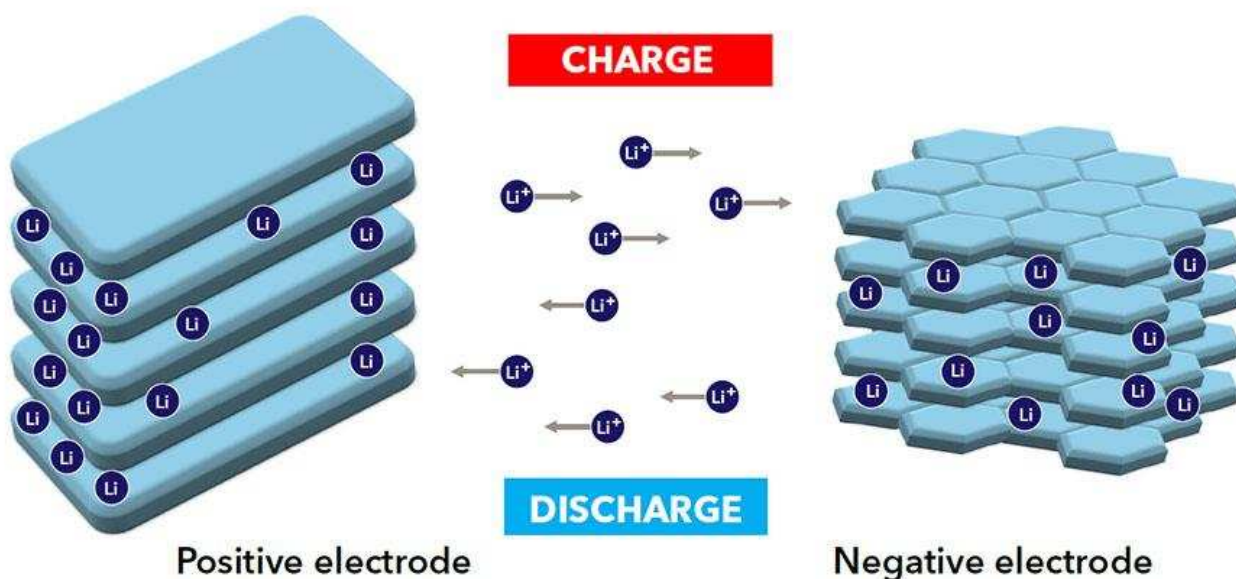
W przeciwieństwie do anody węglowej, podczas ładowania jony litu na anodzie LTO tworzą związek chemiczny. Oznacza to, że jej skład chemiczny po rozładowaniu jest inny, niż po naładowaniu. Z powodu tej zmiany chemicznej następuje również zmiana strukturalna i zmiana ta kompensuje niemal całkowicie przyrost objętości spowodowany dodatkowymi jonami litu. Efektem jest niemal całkowity brak zmiany objętości anody w zależności od stanu naładowania. Katoda akumulatora litowo-jonowego także wykorzystuje interkalację do wiązania jonów litu, jednak tutaj jon metalu lub mieszanina jonów różnych metali będących częścią związku chemicznego (tlenku lub soli) wchodzi w reakcję utleniania-redukcji. Dla uproszczenia związek metalu oznaczony został jako HOST w reakcji na katodzie, rozładowanie od lewej do prawej.



W celu zachowania obojętnego ładunku katoda musi zaabsorbować jeden elektron na każdy jon litu wiązany przez interkalację. Przez związanie elektronu podczas rozładowania substancja HOST jest redukowana elektrochemicznie i zyskuje ładunek ujemny. Jon litu nie bierze udziału w tej reakcji, jego rolą jest zachowanie równowagi ładunku przez interkalację, co utrzymuje obojętny ładunek katody. Nazwy akumulatorów litowo-jonowych zazwyczaj pochodzą od substancji HOST. Poniższa tabela zawiera przegląd najczęściej stosowanych substancji i ich reakcji utleniania-redukcji.

Nazwa	Reakcja substancji HOST	Reakcja redoks
Tlenek kobaltowo-litowy	$CoO_2 + e \leftrightarrow CoO_2^-$	$Co^{4+} + e \leftrightarrow Co^{3+}$
Tlenek niklowo-litowy	$NiO_2 + e \leftrightarrow NiO_2^-$	$Ni^{4+} + e \leftrightarrow Ni^{3+}$
Tlenek manganowo-litowy	$Mn_2O_4 + e \leftrightarrow Mn_2O_4^{2-}$	$Mn^{4+} + e \leftrightarrow Mn^{3+}$
Fosforan żelazowo-litowy	$FePO_4 + e \leftrightarrow FePO_4^-$	$Fe^{3+} + e \leftrightarrow Fe^{2+}$

Kolumna z reakcją redoks wskazuje substancje, które biorą udział w reakcji utleniania-redukcji na katodzie. Do budowy ogniw litowo-jonowych mogą być używane same tlenki niklu, manganu i kobaltu. Katoda może być również zbudowana z mieszaniny tych tlenków. Taka katoda jest nazywana katodą NMC. Katody tego typu są często używane do zapewniania gęstości energii na poziomie zbliżonym do tego, który zapewniają ogniwa z tlenkiem kobaltu, jednocześnie zapewniając bezpieczeństwo porównywalne z ogniwami z tlenkiem manganu. Należy zauważyć, że katoda akumulatora litowo-jonowego zawsze zawiera jony litu, nawet w przypadku jego całkowitego naładowania. Całkowicie delitowana katoda staje się niestabilna, szybciej się starzeje i jest podatna na uszkodzenia termiczne. Z tego powodu w całkowicie naładowanym ogniwie na katodzie pozostaje zawsze od 20% do 50% jonów litu.



Rysunek 2 — „Reakcja” interkalacji w baterii jonowo litowej.

Wody nie można używać jako elektrolitu w akumulatorze litowo-jonowym z dwóch powodów. Po pierwsze, potencjał ogniwa jest zbyt wysoki, by mogły być używane z elektrolitem wodnym — w wyniku elektrolizy woda zostałaby rozdzielona na wodór i tlen. Po drugie, anoda z interkalowanymi jonami litu wykazuje reaktywność zbliżoną do litu jako metalu. Oznacza to, że podczas ładowania zachodziłaby reakcja anody z elektrolitem wodnym skutkująca powstaniem wodorotlenku litu i wodoru w stanie gazowym. Dlatego jako elektrolitu używa się rozpuszczalnika niepolarnego. Zazwyczaj jest to mieszanina rozpuszczalników organicznych z rozpuszczoną solą litu. Najczęściej stosowana sól to heksafluorofosforan litu — LiPF_6 . Rozpuszczony LiPF_6 stanowi źródło jonów ruchomych odpowiedzialnych za transport ładunków wewnątrz ogniwa.

W odróżnieniu od akumulatorów o składzie chemicznym na bazie wody (tj. akumulatorów kwasowo-olowiowych i różnych rodzajów akumulatorów niklowych), w przypadku ogniwa litowo-jonowych przeprowadzenie bezpiecznej i zrównoważonej reakcji przeładowania nie jest możliwe. Przeładowanie ogniwa litowo-jonowych skutkuje nadmiernym usunięciem litu z katody, osadzeniem się litu na anodzie i rozkładem elektrolitu. Te procesy nieodwracalnie uszkadzają ogniwo i ostatecznie mogą prowadzić do niestabilności cieplnej, a w konsekwencji do zapłonu akumulatora. Z tego powodu systemy wykorzystujące akumulatory litowo-jonowe muszą być wyposażone w system zarządzania akumulatorami (BMS). Taki system musi umożliwiać pomiar napięcia poszczególnych ogniw, monitorowanie temperatury i korektę niezrównoważenia stanu naładowania ogniwa akumulatora bez konieczności przeładowania. Decyzję o zaprzestaniu rozładowywania lub redukcji prądu ładowania akumulatora powinno się podejmować, gdy tylko napięcie pierwszego ogniwa akumulatora osiągnie wartość przewidzianą dla zakończenia ładowania lub rozładowywania. Z tego względu jakiegokolwiek niezrównoważenie stanu naładowania akumulatora skutkuje pozorną utratą jego pojemności. Niezrównoważenie musi zostać skorygowane przy użyciu funkcji bilansowania systemu BMS. Natomiast w przypadku akumulatorów kwasowo-olowiowych system BMS jest rzadko stosowany na poziomie ogniwa, a niezrównoważenie kompensuje się poprzez celowe przeładowanie akumulatora.

Ogniwa litowo-jonowe są zawsze zamykane w hermetycznej osłonie, ponieważ wystawienie na działanie wody i tlenu w atmosferze szybko doprowadziłoby do uszkodzenia elementów składowych tych ogniw. W przypadku przeładowania lub innego zdarzenia skutkującego wzrostem ciśnienia gazu urządzenie odcinające dopływ prądu (CID) wewnętrznie rozłącza ogniwo z zewnętrznymi połączeniami. W ogniwach pryzmatycznych często do tego celu służy dysk wypychany na zewnątrz przez nadmierne ciśnienie gazu. Do dysku przyłączony jest dodatkowo naładowany wypust, który w takiej sytuacji przerywa połączenie. W ogniwach cylindrycznych przewężenie w obwodzie ściany ogniwa umożliwia jego wydłużenie się, co skutkuje przerwaniem wewnętrznego połączenia. Oprócz CID w skład ogniwa czasem wchodzi również element PTC (oporowy czujnik temperatury, którego rezystancja rośnie wraz ze wzrostem temperatury). Ten element cechuje bardzo niska (niemal bez znaczenia) rezystancja w temperaturze pokojowej, natomiast powyżej określonej temperatury jego rezystancja gwałtownie wzrasta. Takie zabezpieczenia mogą być wbudowane w ogniwo w celu zmniejszenia ryzyka niestabilności cieplnej wywołanej przez przyczyny zewnętrzne.

Rzadziej spotykane rodzaje akumulatorów

Akumulatory sodowo-siarkowe

Obecnie akumulatory sodowo-siarkowe na skalę komercyjną produkuje wyłącznie japońska firma NGK Insulators. W tych akumulatorach na anodzie stosuje się roztopiony sód, a na katodzie — roztopioną siarkę, przy czym za warstwę rozdzielającą służy cylindryczna membrana z porowatego tlenku glinu (zwanego β -aluminium). Membranę umieszcza się wewnątrz cylindra ze stali nierdzewnej, który stanowi zewnętrzną ścianę ogniwa. Pierścieniowata przestrzeń między membraną a cylindrem jest wypełniana siarką, a wewnątrz cylindrycznej membrany zawiera sód. Podczas rozładowywania sód jest utleniany i pod postacią jonów dodatnich migruje przez separator z β -aluminium do zbiornika z siarką. Tam, łącząc się z siarką zredukowaną na biegunie ujemnym, tworzy związki siarczku sodu. Aby ogniwo działało, wszystkie reagenty muszą być w stanie ciekłym, co oznacza, że standardowa temperatura robocza dla tego ogniwa to około 300°C. Podczas

zwykłej cyklicznej pracy niewielka strata energii wewnątrz ogniów zapewni dość ciepła, aby reagenty pozostały roztopione. Blok ogniów zawiera element grzewczy umożliwiający ogrzewanie ogniów w czasie bezczynności.

Dużym atutem akumulatora sodowo-siarkowego jest dostępność i niska cena materiałów aktywnych. Siarka to produkt uboczny procesów odsiarczania paliw, co sprawia, że jej zapasy są duże, a ceny niskie. Sód jest szóstym pod względem rozpowszechnienia pierwiastkiem na Ziemi. Występuje w skałach, złożach mineralnych i morskiej wodzie. Popyt na obie substancje jest stosunkowo niski, biorąc pod uwagę ich dostępność. Tym samym niedobór tych materiałów jest mało prawdopodobny.

Wadą akumulatora sodowo-siarkowego jest wysoka reaktywność gorących elementów składowych. Roztopiony sód przy kontakcie z powietrzem ulega spontanicznemu zapłonowi. Ponadto reakcja rekombinacji, podczas której sód zostaje zmieszany z siarką, uwalnia dużą ilość ciepła. Zatem ogniwo, które ulega uszkodzeniu podczas pracy, stanowi poważne zagrożenie pożarowe, a ogień rozprzestrzenia się szybko w bloku, o ile nie zastosowano solidnych środków zapobiegających. Taki pożar miał miejsce 21 września 2011 r. w należącym do firmy TEPCO zakładzie magazynowania energii w oparciu o akumulatory sodowo-siarkowe (źródło 7). W związku z tym wydarzeniem firma NGK udoskonaliła konstrukcję swoich akumulatorów, wprowadzając bezpieczniki na poziomie poszczególnych ogniów i wzmacniając bariery zapobiegające rozprzestrzenianiu się ognia.

Akumulatory niklowe

Akumulatory niklowe stosowane w instalacjach o większej skali szybko stają się przestarzałym rozwiązaniem z uwagi na ich wysoką cenę. Akumulatory niklowo-kadmowe do zastosowań wymagających wysokiej mocy chwilowej i niezawodności w szerokim zakresie temperatur utrzymały się na rynku, ale z uwagi na toksyczność kadmu, są one w miarę możliwości stopniowo wycofywane. Akumulatory niklowo-metalowo-wodorowe pod względem niezawodności mają niewielką przewagę nad konwencjonalnymi mokrymi akumulatorami kwasowo-ołowiowymi. Jednakże są one droższe. Z tego względu, jak również z uwagi na coraz większą konkurencję ze strony systemów litowo-jonowych, w systemach magazynowania energii podłączonych do sieci akumulatory niklowe stosuje się coraz rzadziej.

Akumulatory z wykorzystaniem roztopionej soli

Kolejny rodzaj akumulatora wysokotemperaturowego to akumulator sodowo-niklowo-chlorkowy. Akumulator ZEBRA wprowadzony na rynek przez firmę FIAMM to wersja komercyjna akumulatora o takim składzie chemicznym. Obecnie ich udział na rynku jest niewielki i nic nie wskazuje, aby miał ulec zmianie w najbliższej przyszłości. Dlatego ten rodzaj akumulatorów nie jest omawiany bardziej szczegółowo w niniejszej nocie aplikacyjnej.

Inne rodzaje akumulatorów

Akumulatory wymienione poniżej nie są omawiane szczegółowo, ale mimo to zasługują na wzmiankę.

- W akumulatorach cynkowo-powietrznych na anodzie stosuje metaliczny cynk, a katoda jest powietrzna. Z uwagi na fakt, że reagent katody nie musi znajdować się wewnątrz ogniwa, akumulatory te umożliwiają uzyskanie wysokiej objętościowej gęstości energii. Jednakże ich całkowita efektywność energetyczna jest gorsza niż w przypadku akumulatorów litowo-jonowych (których udział na rynku wynosi obecnie 75%). W momencie przygotowywania niniejszej publikacji znany jest jeden producent: firma Fluidic Energy.
- Akumulatory wykorzystujące słoną wodę to akumulatory sodowo-jonowe z wodnym elektrolitem. Obecnie w sprzedaży komercyjnej dostępne są akumulatory tylko jednego producenta — firmy Aquion. Gęstość energii tych akumulatorów jest nieco niższa niż akumulatorów kwasowo-ołowiowych, a efektywność energetyczna — porównywalna. Są one odpowiednie do zastosowań wymagających długich cykli (magazynowanie typu dzień-noc), a ich okres eksploatacji wynosi około 3000 pełnych cykli ładowania i rozładowania w przypadku tego typu zastosowań. Ponadto elementy składowe są

nietoksyczne, dzięki czemu akumulatory te stanowią atrakcyjną propozycję dla zastosowań na terenach mieszkalnych.

Akumulatory przepływowe

Tradycyjne akumulatory składają się z ogniw, w których zamknięte są wszystkie reagenty. Te reagenty są często w stanie stałym (aczkolwiek nie jest to regułą). Natomiast w akumulatorach przepływowych reagent dodatni i reagent ujemny są magazynowane na zewnątrz ogniwa. Samo ogniwo składa się z membrany jonowymiennej, która rozdziela reagent dodatni od ujemnego, ale umożliwia wymianę jonów (najczęściej jonów dodatnich) między ujemną i dodatnią połową ogniwa. Na obu połowach ogniwa znajdują się odbieraki prądu zapewniające połączenia elektryczne. Reagenty, które są rozpuszczone, zawieszane lub skompleksowane w cieczy, pompuje się ze zbiorników przez obie połowy ogniwa. Reagent ujemny nazywany jest anolitem a dodatni — katolitem. Akumulator przepływowy składa się z kilku ogniw połączonych elektrycznie w szereg. Takie połączenie szeregowo zazwyczaj ma postać kilku warstw pojedynczych ogniw przepływowych nazywanych stosem ogniw.

Najważniejszą zaletą tego systemu jest niemal całkowita niezależność pojemności od mocy akumulatora. Osiągalna moc zależy od wielkości stosu ogniw, a pojemność — od ilości elektrolitu w zbiornikach. Aby zwiększyć pojemność systemu akumulatorów przepływowych, należy zainstalować większe zbiorniki i wypełnić je elektrolitem. Zatem wzrost ceny systemu w przeliczeniu na dodatkowe kWh może być bardzo niski. Jednakże, z uwagi na złożoność rozwiązania polegającego na pompowaniu cieczy reaktywnych przez system oraz wysoki koszt stosów ogniw, koszty w przeliczeniu na jednostkę mocy są wysokie w porównaniu do tradycyjnych akumulatorów. Dlatego akumulatory przepływowe są atrakcyjnym rozwiązaniem przede wszystkim w przypadku zastosowań, w których czas ładowania/rozładowywania to co najmniej kilka godzin.

Liczba reakcji chemicznych, które zachodzą w obecnie stosowanych akumulatorach przepływowych, jest zbyt duża, aby omawiać je w niniejszej publikacji. Z komercyjnego punktu widzenia najlepiej opracowany jest system, w którym wykorzystuje się wyłącznie wanad, przy czym system cynkowo-bromowy niewiele mu ustępuje. W tym drugim systemie cynk jest metaliczny, a więc jedynie połowa akumulatora jest typu przepływowego. Jednakże zwiększenie pojemności wymaga jedynie zwiększenia rozmiaru elementu z cynku, a rozwiązanie to jest równie proste i tanie jak zwiększenie rozmiaru zbiornika.

Główną wadą akumulatorów przepływowych jest niska gęstość energii. Technologia nieprzerwanie się rozwija. Mimo ciągłych postępów, objętościowa gęstość energii możliwa do osiągnięcia nadal jest ograniczona, ponieważ reagenty muszą być zmieszane z płynnym nośnikiem, który nie bierze udziału w reakcji wytwarzania magazynowanej energii. Z uwagi na fakt, że połowa jego reagentów jest w stanie stałym, gęstość energii akumulatora cynkowo-bromowego może być porównywalna lub nieco wyższa niż w przypadku akumulatora kwasowo-ołowiowego. Akumulatory o innym składzie chemicznym charakteryzują się niższą gęstością energii. Ogranicza to możliwości ich wykorzystania w zastosowaniach stacjonarnych.

Kondensatory

Kondensatory i akumulatory to dwie zupełnie różne historie. W kondensatorach energia jest magazynowana w polu elektrycznym, natomiast w akumulatorach magazynowanie energii następuje na skutek odwracalnej reakcji elektrochemicznej. Jednakże nowe rozwiązania, takie jak elektryczny kondensator dwuwarstwowy i kondensator litowo-jonowy, sprawiają, że ta różnica nie jest już tak wyraźna. Pod względem połączeń elektrycznych urządzenia te funkcjonują podobnie jak tradycyjne kondensatory, ale ich pojemność jest o trzy do czterech rzędów wielkości wyższa (licząc w tysiącach faradów) niż pojemność zwykłych kondensatorów, podczas gdy ich napięcie robocze jest rzędu kilku woltów, podobnie jak w przypadku akumulatorów. Choćby wykracza to poza zakres niniejszego dokumentu, kondensatory te zasługują na wzmiankę, ponieważ doskonale sprawdzają się w przypadku zastosowań wymagających szybkiego ładowania, gdzie wykazują dłuższy okres eksploatacji w przeliczeniu na cykle (w porównaniu do zwykłych akumulatorów) oraz wysoką gęstość mocy i dobrą efektywność z uwagi na brak histerezy napięciowej. Z powodzeniem używa ich się do regulacji częstotliwości oraz jako elementy trakcji kolejowej służące do podtrzymywania napięcia. Mniej

nadają się do zastosowań o dłuższym czasie ładowania z uwagi na niską objętościową gęstość energii i wysoki koszt w przeliczeniu na jednostkę magazynowanej energii.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA EFEKTYWNOŚĆ SYSTEMU MAGAZYNOWANIA ENERGII

Czynniki wspólne dla wszystkich rodzajów systemów magazynowania energii

Straty oporowe

Straty oporowe, nazywane również stratami I^2R , są spowodowane przez niezerową rezystancję elementów przewodzących prąd. Element, przez który przepływa prąd I będzie wykazywał spadek napięcia $V=I \times R$. Moc traconą w elemencie wyraża się jako $P=V \times I$, a zatem $P=I^2R$. Ta strata jest uwalniania z elementu w postaci ciepła. Tego typu strata zachodzi w każdym elemencie systemu magazynowania energii, przez który przepływa prąd. Utrata mocy jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu przepływającego przez element. Zważywszy na fakt, że wymagana ilość prądu przewodzonego przez przewodnik jest zwykle wartością ustaloną, jedyną realną metodą kontroli strat oporowych jest zmniejszenie rezystancji elementu. Rezystancja przewodników jest mniejsza, gdy są one krótkie i grube, a przy tym wykonane z materiałów charakteryzujących się dobrą przewodnością. Miedź, z uwagi na rezystywność wynoszącą $1,68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, podczas gdy rezystywność glinu wynosi $2,56 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, jest najlepszym przewodnikiem elektrycznym, gdy porówna się przewodniki o tym samym przekroju. Gdy jednak masa przewodnika jest ważniejsza niż jego rozmiar, korzystniejsze może być zastosowanie glinu z uwagi na jego niski ciężar właściwy. Transformatory, przewody i ujemne odbieraki prądu akumulatorów litowo-jonowych to przykłady zastosowań, w których przestrzeń na przewodniki jest ograniczona, dlatego miedź to najlepszy wybór, gdy wymagane są elementy o wysokiej efektywności energetycznej.

Straty spowodowane przez półprzewodniki w przetworniku

Przetworniki elektroniczne, w których wykorzystuje się tranzystory typu MOSFET (tranzystory polowe typu metal-tlenek-półprzewodnik) i IGBT (tranzystory bipolarne z izolowaną bramką), wytwarzają napięcie sinusoidalne o niewielkim zniekształceniu. Pozwala to na dokładne kontrolowanie napięcia wyjściowego poprzez szybkie włączanie i wyłączenie, a tym samym regulację czasu włączenia w stosunku do czasu wyłączenia. Częstotliwość przełączania niewielkich falowników (używanych w gospodarstwach domowych) często przekracza próg słyszalności ucha ludzkiego, aby urządzenia te pracowały bezgłośnie. Większe przetworniki pracują w jednym zakresie kiloherców. W stanie wyłączenia przełączniki półprzewodnikowe magazynują znikomą ilość energii w swoich wewnętrznych kondensatorach pasożytniczych. Ta energia jest tracona w postaci ciepła, gdy przełącznik półprzewodnikowy zostaje włączony. Choć ilość wspomnianej energii jest minimalna, do takiej straty dochodzi w każdym elemencie przełączającym przy częstotliwości przełączania. Rozwiązaniem są wielopoziomowe topologie przełączania przy napięciu zerowym, jednak wymaga to zastosowania bardziej złożonych przetworników.

Straty oporowe mają miejsce również w przełącznikach półprzewodnikowych, częściowo z powodu niezerowej rezystancji materiałów, a częściowo wewnątrz samego urządzenia. Włączone tranzystory typu MOSFET działają jak rezystor, a zatem są podatne na straty I^2R tak jak każdy inny przewodnik. Aby przetworniki pracowały w sposób wydajny, ta rezystancja, wyraźnie określona w specyfikacji urządzenia jako $R_{DS(on)}$, musi być możliwie jak najniższa, a przy tym ilość energii magazynowanej w postaci pojemności pasożytniczej musi być niewielka. Pod względem wydajności odpowiednie cechy (tj. niską wartość $R_{DS(on)}$) wykazują krzemowe tranzystory typu MOSFET, których napięcie znamionowe wynosi około 500 woltów. W przypadku urządzeń krzemowych o wyższym napięciu znamionowym wartość $R_{DS(on)}$ jest niewspółmiernie wysoka. Ma to poważny wpływ na ich wydajność, gdy poziom mocy przekracza kilkadziesiąt watów. Tranzystory typu IGBT charakteryzują się wyższą przewodnością przy wysokich napięciach roboczych, dzięki czemu są bardziej wydajnym elementem przełączającym w przypadku napięcia powyżej 500 woltów. Na rynek wchodzi też tranzystory typu MOSFET wykonane z węgla krzemu (SiC), które mogą przewodzić prąd o wyższym natężeniu przy

wyższym napięciu. Maksymalne napięcie znamionowe urządzeń obecnej generacji wynosi 1700 woltów, a osiągalne robocze natężenie prądu jest porównywalne z 300-woltowymi urządzeniami krzemowymi.

Inny rodzaj strat przy przełączaniu można zaobserwować w tranzystorach typu IGBT. Jest to tzw. *ogon prądowy*. Tranzystora typu IGBT nie można wyłączyć natychmiast. Z chwilą rozpoczęcia procedury wyłączania część prądu włączenia utrzymuje się przez pół mikrosekundy po wzroście napięcia w urządzeniu. Przez te pół mikrosekundy w urządzeniu następuje rozproszenie energii rzędu jednej czwartej mocy wyjściowej przetwornika. Z tego powodu w tranzystorach typu IGBT stosuje się stosunkowo niskie częstotliwości przełączania, aby czas występowania ogona prądowego wynosił poniżej 1%. Zazwyczaj częstotliwości przełączania mieszczą się w zakresie od około 1 do 3 kHz, który dokładnie pokrywa się z zakresem największej czułości ucha ludzkiego, stąd charakterystyczny wysoki dźwięk wydawany przez większe przetworniki i napędy wykorzystujące tranzystory typu IGBT. Problem ten częściowo rozwiązuje zastosowanie tranzystorów IGBT najnowszej generacji, w których czas występowania ogona prądowego skrócono do minimum, lub tranzystorów typu MOSFET wykonanych z węgla krzemu. Brak ogona prądowego w takich tranzystorach oznacza, że można wybrać wyższą częstotliwość przełączania. To z kolei pozwala na zastosowanie mniejszych elementów filtra pasywnego, dzięki czemu przetwornik może potencjalnie pracować z częstotliwością ultradźwiękową niesłyszalną dla ludzkiego ucha. W przetwornikach, w których prąd przepływa przez tranzystory typu IGBT, tyrystory i diody, może następować spadek napięcia przewodzenia. Urządzenia te są zaprojektowane z myślą o zapewnieniu niezerowego napięcia w stanie włączenia tak, aby uniemożliwić przepływ prądu poniżej określonej wartości napięcia. W przypadku urządzeń energoelektronicznych ten spadek napięcia przewodzenia jest rzędu jednego wolta. Jeśli większa liczba urządzeń energetycznych jest podłączana w szereg, spadek napięcia w kierunku przewodzenia sumuje się. Utrata mocy urządzenia jest równa ilorazowi spadku napięcia przewodzenia i natężenia prądu przepływającego przez to urządzenie. Zatem spadek napięcia przewodzenia skutkuje utratą napięcia dostępnego na wyjściu obwodu elektroenergetycznego. Urządzenia, w których następują spadki napięcia przewodzenia, mogą być używane w sposób wydajny wyłącznie w przetwornikach o wysokim napięciu roboczym. Na przykład spadek napięcia w tranzystorze typu IGBT wynoszący około 1 V skutkuje spadkiem napięcia o 0,1% w systemie o napięciu 1000 V. W systemie o napięciu 100 V taki sam spadek napięcia przewodzenia skutkowałby spadkiem 1% napięcia.

Do pracy z napięciem roboczym poniżej 500 woltów najkorzystniej jest używać krzemowych tranzystorów typu MOSFET. Jeśli natomiast wymagane jest wyższe napięcie i moc powyżej kilku kW, większą wydajność zapewniają tranzystory typu IGBT i tranzystory typu MOSFET wykonane z węgla krzemu. Ten drugi typ tranzystorów staje się coraz bardziej konkurencyjny wobec tranzystorów typu IGBT z uwagi na porównywalne napięcia znamionowe przy jednoczesnym zachowaniu niskiej wartości $R_{DS(on)}$, a także brak spadku napięcia znamionowego i ogona prądowego.

Zużycie energii przez systemy pomocnicze

Wszystkie systemy pomocnicze, takie jak systemy zarządzania akumulatorami, komputer sterujący, systemy alarmowe i gaśnicze, cechuje określona energochłonność. Z uwagi na fakt, że systemy te są zwykle zasilane w sposób ciągły, urządzenia muszą być projektowane z myślą o pracy z niską mocą, a oprogramowanie musi umożliwiać oszczędzenie energii (np. poprzez wyłączenie wszelkich nieużywanych urządzeń peryferyjnych). Dzięki nowoczesnym procesorom wbudowanym możliwe jest zastosowanie komputerów sterujących, które zużywają tylko kilka watów mocy (patrz na przykład: wydajność w przeliczeniu na waty uzyskiwana przez komputer jednopłytkowy Raspberry Pi). W efekcie większość energii w systemach sterujących jest zużywana przez siłowniki, takie jak styczniki, oraz urządzenia z interfejsem użytkownika, takie jak wyświetlacze.

We wszystkich systemach pomocniczych prawdopodobnie najwięcej energii zużywa układ kontroli warunków środowiskowych. Z uwagi na fakt, że akumulatory osiągają założony okres eksploatacji i założoną wydajność jedynie w wąskim zakresie temperatur, obniżenie temperatury ogniw wymaga zapewnienia dopływu powietrza lub chłodzenia wodnego, aby wytworzone ciepło mogło być odprowadzane do systemu HVAC. Podstawowym elementem takiego systemu jest często pompa ciepła. Efektywność energetyczna takiej pompy zależy bezpośrednio od jej współczynnika wydajności chłodniczej (CoP), ale zapewne większe znaczenie ma fakt, że energię można zaoszczędzić poprzez ograniczenie jej czasu pracy. W tym celu można ograniczyć ilość ciepła

wytwarzanego przez klimatyzowany system i wyłączyć ze strefy klimatyzowanej te części systemu, które nie wymagają ścisłej kontroli temperatury.

Jednym ze sposobów na zmniejszenie zużycia energii przez system HVAC jest wybór wydajnych energetycznie akumulatorów, które nie wymagają intensywnej wentylacji. Taki akumulator najkorzystniej jest umieścić w zamkniętej przestrzeni z regulacją temperatury, oddzielając go od pozostałej elektroniki. Aby osiągnąć zakładaną wydajność i okres eksploatacji, akumulatory zazwyczaj muszą pracować w temperaturze od 20 do 25°C. Zakres temperatur roboczych urządzeń energoelektronicznych jest zwykle dużo większy, np. od 0 do 40°C pod warunkiem braku kondensacji. Zatem środowisko pracy urządzeń energoelektronicznych nie wymaga tak ścisłej kontroli jak w przypadku akumulatorów.

Współczynniki strat charakterystyczne dla akumulatorów

We wszystkich rodzajach akumulatorów zachodzi zjawisko histerezy napięciowej. Jest to różnica między przepięciem wymaganym do wywołania reakcji chemicznej w kierunku ładowania a pod napięciem wymaganym do wywołania reakcji chemicznej w kierunku rozładowania, uwzględniając zachowanie wymaganego tempa reakcji. Ta różnica skutkuje stratą energii. Innymi słowy: aby naładować akumulator do określonego poziomu, potrzeba więcej energii, niż odzyskuje się w wyniku jego rozładowania. Histereza napięciowa to jeden z podstawowych aspektów reakcji elektrochemicznych zachodzących w akumulatorze. Wartość histerezy napięciowej rośnie wraz ze wzrostem szybkości ładowania lub rozładowywania, co skutkuje zmniejszoną wydajnością akumulatora przy dużych szybkościach. Akumulatory z możliwością szybkiego ładowania i rozładowywania konstruuje się w taki sposób, aby duże powierzchnie materiałów aktywnych na anodzie i katodzie były wystawione na działanie elektrolitu i odbieraków prądu. Zapewnia to wysoką reaktywność tych materiałów. Jednakże odbywa się to kosztem zmniejszenia gęstości energii ogniwa, ponieważ powierzchnie separatora i odbieraków prądu również muszą być większe, co z kolei sprawia, że elementy te zajmują większą niż wcześniej część objętości ogniwa. Zatem ogniwa z możliwością szybkiego ładowania i rozładowywania są większe i droższe niż ogniwa o tej samej pojemności, ale dłuższym czasie ładowania.

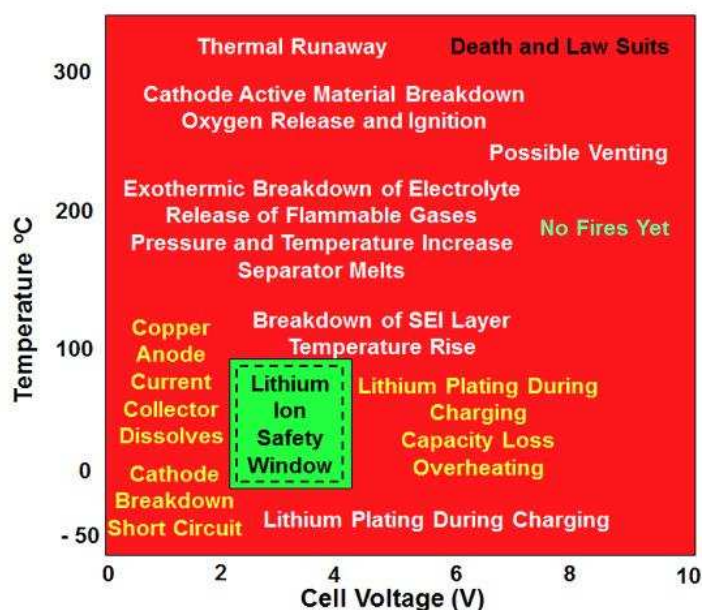
Sprawność kulombowska, zwana również wydajnością energetyczną, to ilość ładunku elektrycznego, którą można odzyskać z akumulatora po naładowaniu go do określonego poziomu, aby przywrócić początkowy stan naładowania tego akumulatora. W idealnym akumulatorze można odzyskać cały ładunek, którego użyto do jego naładowania. Oznacza to, że jedyne reakcje chemiczne, które w nim zachodzą, to reakcje ładowania i rozładowania. W rzeczywistości na wszystkich etapach użytkowania zachodzą również reakcje uboczne. Najważniejsze to reakcje rozkładu elektrolitu, które bezzwrotnie zużywają ładunek elektryczny.

Wewnątrz ogniwa dochodzi do straty oporowej wynikającej z rezystancji metalicznej i jonowej, podobnie jak ma to miejsce w przewodnikach metalicznych. Strata oporowa powstaje podczas ładowania i rozładowania i można ją w przybliżeniu oszacować, sprawdzając rezystancję wewnętrzną akumulatora, którą w specyfikacji oznacza się symbolem R_{int} , i obliczając utratę mocy według wzoru $P_{loss} = I^2 R_{int}$, gdzie I oznacza natężenie prądu ładowania lub rozładowania.

Reakcje uboczne w akumulatorach litowo-jonowych

Akumulatory litowo-jonowe składają się ze szczelnie izolowanych ogniwa. Oznacza to, że wszelkie szkodliwe efekty reakcji ubocznych są zwykle trwałe. Utraconego elektrolitu nie można uzupełnić. Rozkład elektrolitu skutkuje zmniejszeniem pojemności ogniwa, ponieważ produkty rozkładu osadzają się na elektrodach, tym samym zmniejszając mobilność jonów litu w ogniwie. Ponadto jony litu wnikają w te osady i są bezpowrotnie tracone, co obniża pojemność ogniwa. Na skutek rozkładu elektrolitu wzrasta ciśnienie gazu wewnątrz ogniwa. Oznacza to, że w miarę możliwości należy zapobiegać rozkładowi podczas normalnego użytkowania ogniwa, upewniając się, że jest ono używane wyłącznie w bezpiecznym zakresie napięcia i temperatury. Na Rysunku 2 przedstawiono przegląd niepożądanych reakcji ubocznych, które mogą zachodzić w ogniwie litowo-jonowym, wraz z towarzyszącymi im okolicznościami.

Lithium Ion Cell Operating Window



Rysunek 3 — Bezpieczny zakres wartości roboczych ogniwa litowo-jonowego Źródło: <http://www.mpoweruk.com> (8).

Reakcje uboczne w akumulatorach kwasowo-ołowiowych

Tak jak w przypadku akumulatorów litowo-jonowych, również w akumulatorach kwasowo-ołowiowych rozkład elektrolitu to poważna reakcja uboczna. Jednakże w tym przypadku utracony elektrolit (wodę) można uzupełnić. W mokrych akumulatorach kwasowo-ołowiowych wodę destylowaną uzupełnia się raz w roku w ramach rutynowej konserwacji. W akumulatorach kwasowo-ołowiowych regulowanych zaworem (VRLA) za resyntezę wody, która uległa rozkładowi, odpowiada zamknięty obieg tlenu (COC). W takiej sytuacji uzupełnianie wody nie jest wymagane, więc akumulatory tego rodzaju są hermetycznie zamknięte i wyposażone w zamontowany na stałe zawór nadciśnieniowy. Niestety ładunek elektryczny tracony w wyniku rozkładu wody w akumulatorach VRLA nie jest odzyskiwany przez COC; energia reakcji resyntezy jest uwalniana pod postacią ciepła.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA OKRES EKSPLOATACJI SYSTEMU MAGAZYNOWANIA ENERGII

W niniejszej nocie aplikacyjnej zostaną omówione mechanizmy przyczyniające się do zużycia i starzenia się systemów akumulatorowych. Zmieniające się okoliczności, w wyniku których określony system staje się przestarzały, wykraczają poza zakres tematyczny niniejszego artykułu.

Mechanizmy starzenia się elementów systemu pomocniczego

Niezależnie od zastosowanej technologii magazynowania energii, w skład systemów magazynowania wchodzi zawsze co najmniej jeden przetwornik mocy oraz rozdzielnica prądu przemiennego (AC) i prądu stałego (DC). Elementy te starzeją się, przez co system z czasem przestaje być niezawodny. Mechanizmy starzenia się i przyczyny awarii tych systemów są bardzo zróżnicowane z uwagi na dużą liczbę elementów o różnym przeznaczeniu. Poniżej opisano kilka możliwych przyczyn awarii przetworników elektronicznych:

Kondensatory elektrolityczne w urządzeniach elektronicznych

Awaria spowodowana wysychaniem elektrolitu, przyspieszonym wysoką temperaturą i wysokim natężeniem prądu. Kondensator stopniowo traci pojemność lub gwałtownie rozszczelnia się, jak pokazano na Rysunku 4. Rozlany elektrolit może uszkodzić inne elementy elektroniczne. Każdorazowe obniżenie temperatury roboczej kondensatora o 10°C w stosunku do jego temperatury znamionowej dwukrotnie wydłuża jego okres eksploatacji.

Półprzewodniki elektroenergetyczne

Awaria wynikająca z naprężenia napięciowego (przebieg i gwałtownych wzrostów indukcji skutkujących przebiciem elektrycznym), cyklu cieplnego, naprężenia mechanicznego i wysokiej temperatury. W uszkodzonych urządzeniach powstają prądy upływowe skutkujące dodatkowym rozproszeniem ciepła, a to z kolei prowadzi do awarii. Zdarzają się również nagłe nieprzewidziane awarie. Półprzewodniki elektroenergetyczne często wywołują zwarcie w momencie awarii, co może pociągać za sobą kolejne uszkodzenia, a ostatecznie doprowadzić do przepalenia się bezpiecznika.

Wentylatory i pompy chłodzące

Awaria w wyniku zużycia (łożyska) przyspieszonego zabrudzeniem i nagrodzeniem się pyłu. Awaria w wyniku utraty środka smarującego przyspieszonej wysoką temperaturą. Awaria w wyniku przegrzania.

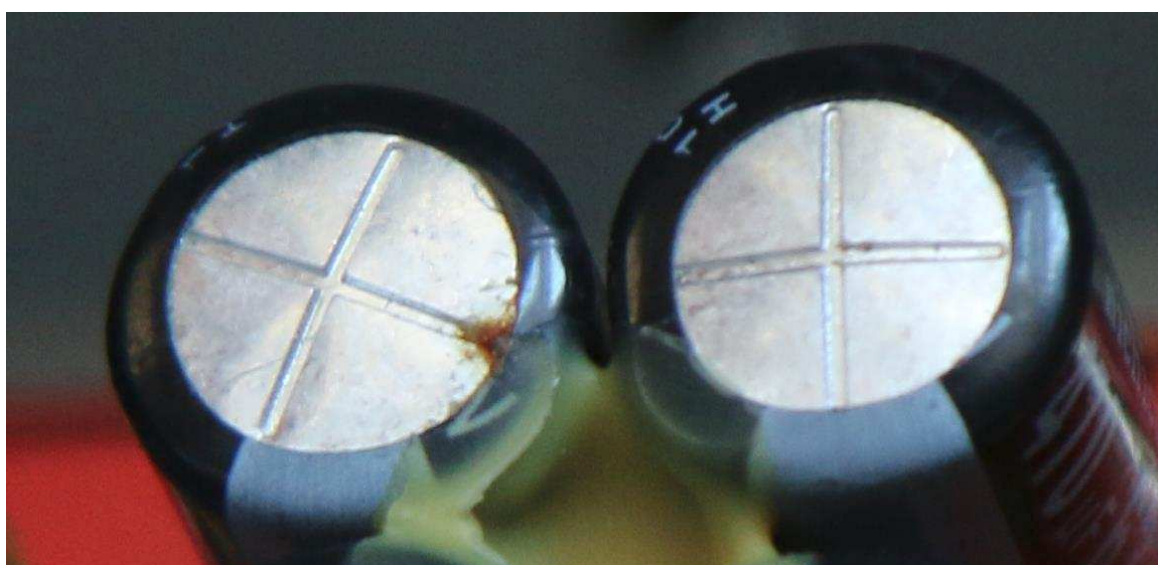
Obwody drukowane

Awaria w wyniku korozji połączeń lutowanych i ścieżek, naprężenia mechanicznego i wibracji. Przyspieszona wysoką temperaturą, wilgocią i zabrudzeniem.

Elementy na obwodach drukowanych

Korozja i przegrzanie przyspieszone zabrudzeniem i wysoką temperaturą. Podsystemy mikroprocesorowe

Awaria w wyniku utraty danych zapisanych w układzie scalonym oraz na wewnętrznych i zewnętrznych nośnikach wchodzących w skład systemu. Nośniki danych są wrażliwe na temperaturę. Utrata danych z pamięci trwałej w wyniku wyczerpania się akumulatora zegara głównego. Cyberprzestępczość.



Rysunek 4 — Uszkodzenia kondensatorów elektrolitycznych. Kondensator po prawej jest wybrzuszony, a z kondensatora po lewej wycieka elektrolit.

Czynnikiem wspólnym dla większości przyczyn awarii jest ciepło: im bardziej rozgrzany jest określony element, tym szybciej się starzeje. Zabrudzenie skutkuje wzrostem temperatury, ponieważ na elementach tworzy się warstwa izolacyjna. W szczególności warstwa zabrudzeń w połączeniu z wilgocią w środowisku pracy skutkuje szybką korozją narażonych części metalowych, takich jak styki elementów na obwodach drukowanych. Zabrudzenia wchłaniają wilgoć, na skutek czego zaczynają działać jak elektrolit i stają się przewodnikami. W ten sposób powstają prądy upływowo, a w konsekwencji następuje korozja elektrochemiczna przewodników stykających się z zabrudzonymi elementami. Można temu częściowo zaradzić poprzez pokrywanie obwodów drukowanych ochronną powłoką konforemną. Jednakże złącza i elementy elektromechaniczne, takie jak wentylatory, przełączniki i przelączniki, nie mogą być chronione w ten sposób. Dlatego podczas konstruowania i użytkowania przetworników i rozdzielnic należy pamiętać o poniższych wytycznych.

- Należy upewnić się, że elementy są **użytkowane zgodnie z ich mocą znamionową**, aby ilość wytwarzanego wewnątrz nich ciepła nie przekraczała ich możliwości rozpraszania ciepła.
- Należy zawsze stosować **odpowiednie chłodzenie**, aby zyskać pewność, że temperatury robocze poszczególnych elementów mieszczą się w zakresie ich temperatur znamionowych. Eksploatacja przy maksymalnej temperaturze znamionowej lub temperaturze zbliżonej do wartości maksymalnej jest niedopuszczalna, jeśli wymagany jest długi okres eksploatacji i wysoka niezawodność.
- **Należy monitorować pracę systemu chłodzenia** oraz temperaturę elementów wytwarzających duże ilości ciepła, ponieważ awaria jednego wentylatora chłodzącego lub pompy może skutkować przegrzaniem newralgicznego elementu w ciągu zaledwie kilku minut.
- Urządzenia elektroniczne powinny pracować **w czystym środowisku**, co oznacza, że powinno się zapewnić idealne filtrowanie powietrza chłodzącego we wlotach szafek na sprzęt (a filtry muszą być utrzymywane w czystości) lub powietrze chłodzące powinno być doprowadzane z czystego środowiska, takiego jak pomieszczenie klimatyzowane za pomocą odpowiednio konserwowanego systemu klimatyzacji budynku.
- Urządzenia elektroniczne **nie powinny nigdy być narażone na wpływ środowiska, w którym zachodzi zjawisko kondensacji**.
- W przypadku stosowania chłodzenia wodnego: system powinien być **wypełniony odpowiednią cieczą chłodzącą zapobiegającą korozji** okresowo sprawdzany pod kątem ewentualnych wycieków i konieczności uzupełnienia cieczy.
- Należy zaplanować **przerwę konserwacyjną na wymianę akumulatorów zegara**. Są one bardzo małe i tanie, ale ich wyczerpanie może uniemożliwić rozruch systemu po wyłączeniu z powodu utraty danych konfiguracyjnych i kluczy szyfrowania zapisanych w pamięci trwałej.

Postępowanie według powyższych wytycznych zapewni niezawodną pracę urządzeń (energo)elektronicznych przy jedynie minimalnej dodatkowej konserwacji. Urządzenia energoelektroniczne do zastosowań na zewnątrz budynków muszą być umieszczane w odpowiednich obudowach ochronnych (Rysunek 3).



Rysunek 5 — Przetworniki mocy do zastosowań na zewnątrz budynków muszą być odpowiednio chronione przed wpływem czynników atmosferycznych, dlatego umieszcza się je w obudowach.

Cyberprzestępczość

Chociaż wykracza to poza zakres tematyczny niniejszej noty aplikacyjnej, należy tu wspomnieć w kilku słowach o cyberprzestępczości, ponieważ może ona mieć istotny wpływ na niezawodność systemu. Łatwo nie docenić mocy obliczeniowej i łączności nowoczesnych wbudowanych urządzeń elektronicznych. Pojedynczy wbudowany układ mikroprocesorowy o wartości kilku euro może sterować złożonymi systemami operacyjnymi, takimi jak Linux czy Windows, które jeszcze kilka lat temu wymagały komputera typu PC pracującego z pełną mocą. Ponadto takie procesory zawierają liczne wbudowane interfejsy komunikacyjne, takie jak Ethernet, USB, magistrala CAN, interfejsy kart pamięci itp. Takie zaawansowane systemy wymagają konserwacji i regularnych aktualizacji, aby zapewnić ich bezpieczeństwo. Włączenie ich do jakiegokolwiek sieci naraża je na cyberataki. Dotyczy to nawet systemów, które normalnie funkcjonują w całości poza siecią: zwykły transfer danych lub aktualizacja systemu za pośrednictwem dysku USB lub karty pamięci flash zainfekowanej wirusem może narazić system na działanie szkodliwego oprogramowania i wpłynąć negatywnie na funkcjonalność systemu magazynowania energii.

Mechanizmy starzenia się charakterystyczne dla akumulatorów

Degradacja mechaniczna

Z uwagi na fakt, że substancje wewnątrz akumulatora ulegają zmianom w wyniku reakcji chemicznych, z każdym cyklem zmienia się również ich objętość. Ta zmiana objętości sprawia, że płytki/elektrody przesuwają się względem siebie, nawet gdy są ciasno rozmieszczone w zbiorniku. W wyniku powstałych naprężeń mechanicznych oraz ścierania następuje utrata materiałów na elektrodach, co może negatywnie wpłynąć na integralność separatora. W ten sposób mogą powstawać wewnętrzne zwarcia. Zatem reakcje anody/katody skutkujące dużą zmianą objętości materiałów aktywnych skracają okres eksploatacji akumulatorów. To zjawisko odgrywa największą rolę w akumulatorach kwasowo-ołowiowych, ale zachodzi ono również w akumulatorach litowo-jonowych, w których wykorzystuje się anody na bazie węgla.

Reakcje uboczne

Reakcje uboczne skutkują stratą energii, ponieważ ładunku reakcji ubocznej nie można odzyskać podczas fazy rozładowywania. Ponadto wiele reakcji ubocznych ma istotny wpływ na starzenie się akumulatorów (aczkolwiek nie jest to regułą). Aby zminimalizować niepożądane skutki reakcji ubocznych, należy wiedzieć, jak ograniczyć występowanie tych reakcji w taki sposób, aby nie miało to negatywnego wpływu na główną reakcję ładowania/rozładowania. Reakcje elektrochemiczne zależą od trzech czynników:

- Temperatura. Uogólniona interpretacja równania Arrheniusa przewiduje, że prędkość (szybkość konwersji), z jaką zachodzi reakcja, podwaja się przy każdym wzroście temperatury o około 10°C, gdy wszystkie pozostałe czynniki pozostają bez zmian.
- Stężenie. Im wyższe stężenie reagentów w strefie reakcji, tym szybciej ona zachodzi.
- Potencjał. Im wyższe napięcie użyte do przeprowadzenia półreakcji elektrochemicznej, tym szybciej ona zachodzi.

Powyższe trzy czynniki dotyczą w jednakowym stopniu głównej reakcji ładowania i rozładowania, jak i niepożądanych reakcji ubocznych. W przypadku cyklicznego użycia akumulatorów przyłożone napięcie jest zwykle regulowane w taki sposób, aby osiągnąć wymaganą szybkość ładowania i rozładowania, przy czym wartości napięcia i natężenia prądu muszą mieścić się w zakresach między wartościami minimalnymi i maksymalnymi określonymi przez producenta. Na koniec fazy ładowania, zarówno w akumulatorach litowo-jonowych, jak i kwasowo-ołowiowych można zaobserwować fazę stałego napięcia, podczas której utrzymywana jest stała wartość napięcia — zapobiega się jej wzrostowi w celu utrzymania tempa ładowania. W efekcie szybkość ostatniego etapu ładowania jest ustalana przez sam akumulator, a nie ładowarkę. W tej fazie szybkość preferowanej reakcji ładowania spada, podczas gdy szybkość reakcji ubocznych nie zmienia się lub wzrasta w związku z większą dostępnością w pełni naładowanego reagenta. Zatem to właśnie w fazie stałego napięcia reakcje uboczne mają największe znaczenie.

Mechanizmy starzenia się akumulatorów litowo-jonowych

Mechanizmy cyklicznej degradacji anody

Choć podczas ładowania i rozładowywania na anodzie nie zachodzą żadne zmiany chemiczne, anoda na bazie węgla to elektroda ogniwa litowo-jonowego, która jest najbardziej narażona na starzenie się. Istnieją dwa główne mechanizmy, które przyczyniają się do starzenia się anody: Narastanie warstwy SEI (1) i zmiany struktury (2).

- 1) W nowym akumulatorze litowo-jonowym elektrolit wchodzi w bezpośredni kontakt z węglem w anodzie natychmiast po wypełnieniu akumulatora elektrolitem. Podczas pierwszego ładowania ogniwa w fabryce niewielka część elektrolitu ulega rozkładowi na powierzchni anody, tworząc stałą warstwę, przez którą jony litu w dalszym ciągu mogą przenikać. Ta warstwa pasywacyjna (SEI) zapobiega dalszemu rozkładowi elektrolitu na anodzie. Zawiera ona również chemicznie związany lit. Z tego powodu niewielka — aczkolwiek uwzględniona w rachubie — część litu w nowych ogniwach litowo-jonowych jest tracona podczas pierwszego ładowania formatującego. Choć po początkowym szybkim utworzeniu się warstwy SEI zapobiega się jej dalszemu narastaniu, nie można całkowicie zatrzymać tego procesu, a zatem warstwa SEI nadal narasta powoli w okresie eksploatacji ogniwa. To narastanie warstwy SEI coraz bardziej utrudnia migrację jonów litu do i z anody. W efekcie wzrasta rezystancja wewnętrzna ogniwa. Zważywszy na fakt, że warstwa SEI zawiera również *chemicznie związany lit*, ciągłe narastanie tej warstwy zmniejsza liczbę dostępnych jonów litu, co skutkuje redukcją pojemności.
- 2) W dodatku grubość anody na bazie węgla nieco się zwiększa, gdy jest ona ładowana jonami litu, które zajmują określoną przestrzeń. W efekcie anoda „oddycha” — jej grubość ulega niewielkim zmianom (rzędu kilka μm) podczas ładowania i rozładowywania. Ponadto grubość anody nieco się zwiększa w okresie eksploatacji z powodu ciągłego narastania warstwy SEI. W efekcie otwarta struktura anody jest stopniowo wypychana i przekształcana w strukturę zamkniętą, co skutkuje

zmniejszeniem tej części powierzchni anody, która nadal jest wystarczająco odsłonięta, aby przyjmować jony litu.

Z uwagi na fakt, że w akumulatorze litowo-tytanicowym nie tworzy się warstwa SEI, nie ulega on mechanizmom degradacji związanym z tą warstwą. Ponadto zmiany rozmiaru anody w akumulatorze tego typu podczas jego cyklicznej pracy są minimalne w porównaniu ze zmianami rozmiaru anody na bazie węgla. Skutkuje to znaczną poprawą cyklu ładowania i rozładowywania: wytrzymałość cykliczna akumulatorów litowo-tytanicowych jest zwykle rzędu 10^4 cykli w porównaniu do 10^3 cykli w przypadku akumulatorów z anodą na bazie węgla.

Osadzanie się litu na anodzie

W normalnych warunkach roboczych jony litu nie biorą udziału w reakcjach zachodzących w ogniwie litowo-jonowym. Pozostają przez cały czas zjonizowane i nie tworzą związków. Jednakże w pewnych sytuacjach możliwa jest redukcja elektryczna jonów litu (elektron zostaje wchłonięty w jon), które wytrącają się w postaci metalicznego litu. Ma to miejsce na anodzie z uwagi na nadmiar elektronów łatwo dostępnych na powierzchni węgla podczas ładowania. Wówczas metaliczny lit osadza się bezpośrednio na powierzchni węgla, pod warstwą SEI. Choć jest to odwracalny proces, ma on znaczny negatywny wpływ na zużycie i bezpieczeństwo akumulatora z przyczyn omówionych poniżej.

- 1) Osadzanie się metalu ze stanu rozpuszczonego to proces zależny od pól elektrycznych. W miejscach, gdzie pole elektryczne jest najsilniejsze, osadzanie się następuje najszybciej. Zatem metale osadzają się równomiernie na gładkiej powierzchni w jednorodnym polu elektrycznym, ale niewielka wypukłość powierzchni skutkuje miejscowym wzrostem natężenia pola elektrycznego, a tym samym bardziej intensywnym osadzeniem się metalu. Tworzy się ostro zakończona wypustka, która rozrasta się w tzw. dendryt. Takie dendryty mogą przebić warstwę SEI i separator, a ostatecznie doprowadzić do wewnętrznego zwarcia w ogniwie. Dendryt o niewielkiej grubości zaniknie na skutek impulsu prądu, ale masywniejszy dendryt może być przyczyną na tyle dużego miejscowego wzrostu temperatury i wynikających z niego uszkodzeń, że wywoła niestabilność ciepłą. Należy zawsze unikać warunków, w jakich może dochodzić do osadzania się litu. Jest to jedno z głównych zadań systemu BMS.
- 2) Nawet gdy lit osadza się równomiernie, tworząc gładką powierzchnię bez dendrytów, i powraca do postaci zjonizowanej podczas rozładowywania, może spowodować nagły miejscowy przyrost warstwy SEI, co skutkuje przyspieszonym wiązaniem litu w tych miejscach, a w konsekwencji utratą pojemności i dalszą degradacją anody.

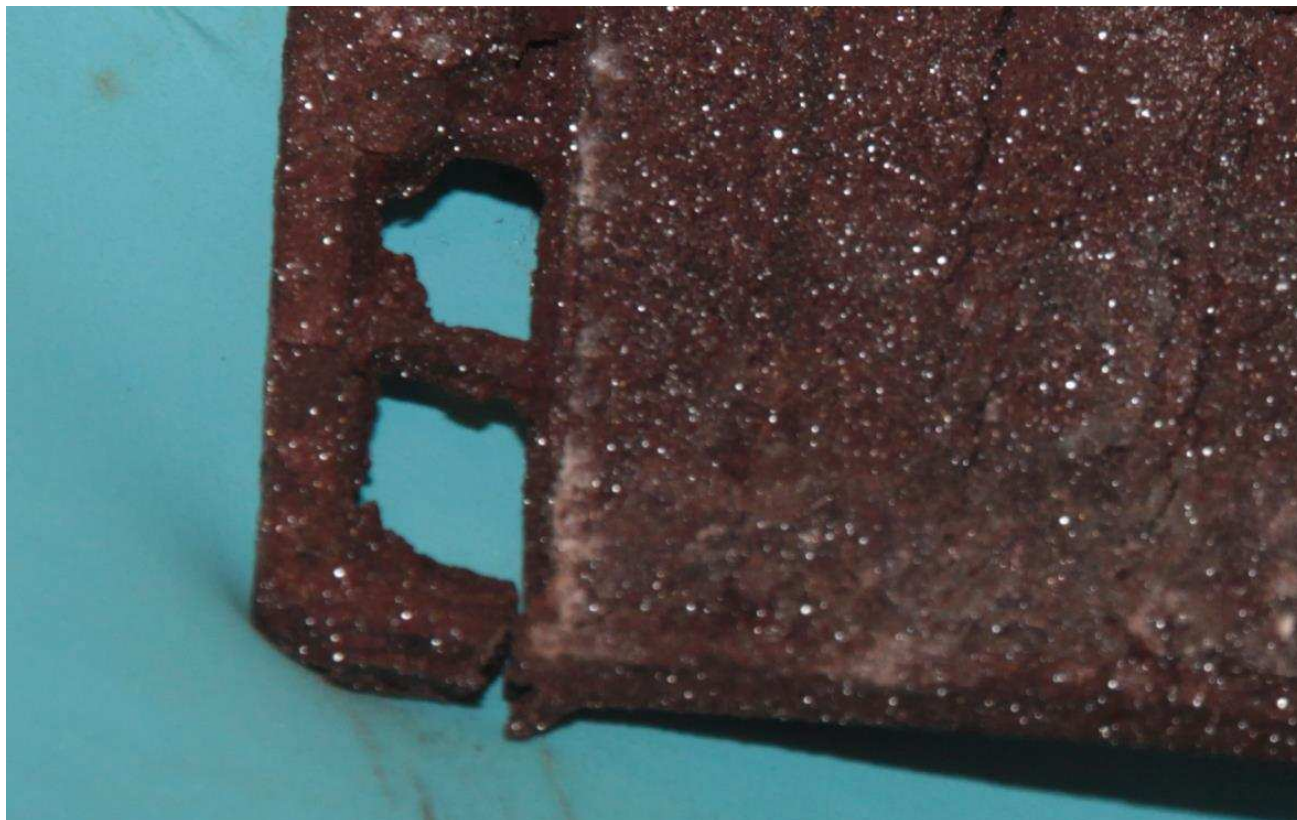
Osadzanie się litu ma miejsce, gdy anoda jest niezdolna do interkalacji z prędkością, z jaką dostarczane są jony litu podczas ładowania. Taka sytuacja ma miejsce, gdy ogniwo jest przeładowane lub ładowane zbyt szybko bądź w zbyt niskiej temperaturze. Zdolność anody do interkalacji zmniejsza się w miarę jak ogniwo się starzeje. Dlatego starsze ogniwa są na ogół bardziej narażone na osadzanie się litu i tworzenie się dendrytów niż fabrycznie nowe ogniwa. Z powyższych informacji wynika, że na starzenie się konwencjonalnych akumulatorów litowo-jonowych największy wpływ ma stan anody. Ogniwa litowo-tytanicowe dowodzą, że tak jest w istocie. Choć ogniwa te różnią się wyłącznie anodą, różnica ta skutkuje dziesięciokrotnie dłuższym okresem eksploatacji w przypadku normalnej pracy cyklicznej.

Mechanizmy starzenia się akumulatorów kwasowo-ołowiowych

Korozja płyty dodatniej

Płyta dodatnia akumulatora kwasowo-ołowiowego jest wykonana ze stopu ołowiu, na którym osadza się ditlenek ołowiu jako materiał aktywny. Podczas reakcji przeładowania woda jest rozdzielana na płycie dodatniej, w wyniku czego powstaje tlen gazowy, który z kolei powoduje korozję ołowianej podstawy płyty dodatniej. W efekcie na płycie dodatniej osadza się więcej dodatnio naładowanego materiału aktywnego (w istocie w nowym akumulatorze jest to jeden z mechanizmów skutkujących zwiększeniem jego pojemności w ciągu kilku pierwszych cykli ładowania i rozładowania). Jednakże prowadzi to również do zmniejszenia

grubości ołowianej podstawy. Objętość płyty dodatniej zwiększa się, gdy ołów w tej płycie jest przekształcany w ditlenek ołowiu. To zjawisko sprawia, że zwiększa się rozmiar płyty dodatniej, staje się ona bardziej krucha i gorzej przewodzi prąd elektryczny. Gdy ten proces starzenia się osiągnie zaawansowany etap, dochodzi do zniekształcenia w wyniku naprężenia mechanicznego, jak ukazano na Rysunku 5. W efekcie części dodatnio naładowanej siatki lub jej połączeń odłamują się i następuje utrata materiału aktywnego. W rzadkich przypadkach może to nawet doprowadzić do wewnętrznego zwarcia, gdy płyta dodatnia zostanie wypchnięta z górnej części stosu płyt i zetknie się z płytą ujemną lub wypustem połączenia/grzebieniem dystansowym. Zatem, aby wydłużyć okres przydatności do użytku płyt dodatnich, należy ograniczyć występowanie reakcji przeładowania.



Rysunek 6 — Powiększenie skutków znacznego starzenia płyty dodatniej akumulatora kwasowo-ołowiowego.

Zasiarczenie

Gdy akumulator kwasowo-ołowiowy jest częściowo naładowany, zarówno płyta dodatnia, jak i płyta ujemna zawierają siarczan ołowiu. Świeży osad siarczanu jest amorficzny i porowaty. Gdy ten siarczan pozostaje nieaktywny przez zbyt długi czas, ulega rekrytalizacji do twardej i nieprzepuszczalnej postaci krystalicznej. Po takiej przemianie siarczan ołowiu nie jest już dostępny do ładowania. Zatem ten proces, zwany zasiarczeniem, prowadzi do utraty pojemności. Proces zasiarczenia na bardzo wczesnym etapie można odwrócić, poddając akumulator przedłużonemu kontrolowanemu przeładowaniu prądem o stałym natężeniu, ale utrzymujące się zasiarczenie jest nieodwracalne. Dlatego okres eksploatacji akumulatora kwasowo-ołowiowego jest najdłuższy, gdy jest on zawsze w pełni naładowany. Ślady zasiarczenia na płycie ujemnej ukazano na Rysunku 6.



Rysunek 7 — Zasiarczenie płyty ujemnej akumulatora kwasowo-ołowiowego

Ładowanie napięciem dającym najlepsze rezultaty pod względem powstrzymania zasiarczenia oraz zapobiegania utracie wody i korozji płyty dodatniej jest nazywane ładowaniem płynnym. Takie ładowanie pozwala zminimalizować ubytek pojemności w wyniku zasiarczenia, a reakcja przeładowania (rozdzielenie wody) zachodzi wówczas bardzo powoli, dzięki czemu szkodliwy wpływ na płytę dodatnią również jest minimalny. Ładowanie napięciem o innej wartości — zarówno wyższej, jak i niższej — skutkuje przyspieszonym ubytkiem pojemności i mniejszą niezawodnością w trybie gotowości.

Nieźrównoważenie ładowania płynnego w szeregach

W przypadku akumulatorów kwasowo-ołowiowych rzadko stosuje się system zarządzania akumulatorami umożliwiający monitorowanie akumulatorów na poziomie ogniw. Zwykle napięcie ładowania płynnego szeregu ogniw jest równe znamionowemu napięciu ładowania płynnego pojedynczego ogniwa pomnożonemu przez liczbę ogniw w szeregu. Jednakże nie ma dwóch identycznych ogniw. Dlatego z czasem może dojść do sytuacji, w której napięcie ładowania nie będzie równo rozdzielane między wszystkie ogniwa. W efekcie niektóre ogniwa będą ładowane napięciem niższym niż optymalne, co spowoduje ich zasiarczenie, podczas gdy inne ogniwa będą ładowane napięciem wyższym niż optymalne, co spowoduje korozję płyty dodatniej. Z kolei jeszcze inne ogniwa w szeregu mogą być ładowane napięciem o wartości zbliżonej do właściwej. Jeśli taka sytuacja będzie miała miejsce przez dłuższy czas, będzie to skutkowało nierównomiernym starzeniem się ogniw połączonych w szereg. Podczas testu pojemności szereg ogniw jest rozładowywany do napięcia odcięcia pojedynczego ogniwa pomnożonego przez liczbę ogniw. Nieźrównoważenie stanu naładowania sprawia, że napięcie w pełni naładowanych ogniw jest wyższe niż napięcie odcięcia, podczas gdy napięcie niedoładowanych ogniw już jest zbyt niskie. Stwarza to ryzyko nadmiernego rozładowania, a nawet odwrócenia polarności niedoładowanych ogniw przed zakończeniem procesu rozładowywania. Jest to częsta przyczyna przedwczesnej awarii ogniwa, zwłaszcza w szeregach wysokonapięciowych złożonych z większej liczby połączonych ogniw.

Starzenie się wynikające z cykli pracy

W związku ze zmianą składu chemicznego płyt podczas ładowania i rozładowywania zmianie ulegają również ich właściwości mechaniczne. Podczas każdego rozładowywania akumulatora kwasowo-ołowiowego ołów na płytach ujemnych i ditlenek ołowiu na płytach dodatnich są przekształcane w siarczan ołowiu. Podczas ponownego ładowania zachodzą odwrotne reakcje. Wpływa to na grubość ogniwa — po każdym rozładowaniu i ponownym naładowaniu akumulatora jest ona nieco inna. Podczas każdego ładowania część siarczanu ołowiu nie jest przekształcana z powrotem w ołów lub ditlenek ołowiu, ponieważ utraciła kontakt z płytą w wyniku wspomnianych zmian mechanicznych. Mechanizm ten odpowiada za krótki okres eksploatacji akumulatorów kwasowo-ołowiowych poddawanych głębokim cyklom ładowania i rozładowywania.

ZAPEWNIANIE ODPOWIEDNIEGO ŚRODOWISKA PRACY

Wentylacja i kontrola temperatury

Z poprzednich rozdziałów wynika, że — niezależnie od zastosowanej technologii — głównym czynnikiem przyspieszającym starzenie się akumulatora jest temperatura. Zapewnienie odpowiedniej temperatury roboczej (zwykle między 20 a 25°C) to najważniejszy warunek, który należy spełnić, aby zapewnić wystarczająco długą żywotność akumulatora. Zbyt wysoka temperatura skutkuje przyspieszonym starzeniem się, natomiast zbyt niska temperatura sprawia, że akumulator nie jest w stanie pracować z wymaganą wydajnością, a wymuszenie takiej wydajności wiąże się z ryzykiem jego uszkodzenia. Oznacza to, że w każdych warunkach środowiskowych, za wyjątkiem najbardziej umiarkowanych, wymagane jest zastosowanie systemu HVAC, który utrzymuje stałą temperaturę i zapobiega zjawisku kondensacji.

Oprócz zapewnienia odpowiedniej temperatury konieczna jest wentylacja pomieszczeń, w których znajdują się akumulatory kwasowo-siarkowe i niklowe. Zawsze uwalnia się z nich niewielka ilość tlenowodoru w stanie gazowym. Wodór może eksplodować, gdy jego stężenie objętościowe w powietrzu przekracza 4%. W mokrych akumulatorach gaz jest odprowadzany bezpośrednio do atmosfery, ale nawet akumulatory kwasowo-olowiowe regulowane zaworem (VRLA) wytwarzają niewielkie ilości tlenowodoru, który ulatnia się przez zawór, a w wyniku dyfuzji również przez obudowę ogniwa. Dlatego w normie IEC 62485-2 określono minimalny przepływ powietrza oraz rozmieszczenie wlotów i wylotów powietrza niezbędnych do utrzymania stężenia wodoru znacznie poniżej 4%. Korzystnie taki przepływ powietrza zapewnia naturalna wentylacja. Spełnienie powyższych wymogów oraz niezbędna kontrola warunków środowiskowych będą skutkować znaczną stratą energii cieplnej, o ile nie zastosuje się zaawansowanego systemu recyrkulacji ciepła.

Podczas pracy akumulatorów litowo-jonowych nie wytwarza się gaz, a zatem ten typ akumulatorów nie wymaga żadnej dodatkowej wentylacji poza zapewnieniem dostępu powietrza osobom pracującym przy akumulatorach. Dzięki temu, jak również dzięki wysokiej efektywności energetycznej ogniw litowo-jonowych, możliwe jest stosowanie mniejszych i bardziej efektywnych energetycznie systemów HVAC lub jedynie minimalna wentylacja pomieszczenia z akumulatorami przy jednoczesnym bezpośrednim ogrzewaniu i chłodzeniu ogniw w akumulatorze. Umożliwia to kontrolowanie temperatury akumulatora w sposób wydajny energetycznie. Jeśli akumulatory są wyposażone we wloty i wyloty powietrza, konieczne jest wyposażenie ich również w awaryjny mechanizm odpowietrzający lub zainstalowanie takiego mechanizmu w pomieszczeniu z akumulatorami. Może on np. mieć postać jednokierunkowego zaworu sprężynowego lub płytki bezpieczeństwa umieszczonej w ścianie zewnętrznej komory lub pomieszczenia tak, aby w razie awarii gazy były odprowadzane na zewnątrz.

Systemy zarządzania akumulatorami

Systemy zarządzania akumulatorami są zintegrowane z akumulatorami, a dzięki nim parametry pracy akumulatorów zawsze mieszczą się w zakresie wartości granicznych dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ponadto taki system może umożliwiać oszacowanie stanu naładowania akumulatora i dostarczanie danych operacyjnych dotyczących tego akumulatora do połączonych systemów. Choć ładowarkę akumulatora zapewniającą odpowiednio kontrolowane ładowanie płynne zespołu akumulatorów kwasowo-olowiowych można uznać za namiastkę systemu BMS, terminem tym zwykle określa się bardziej zaawansowane systemy służące do monitorowania pracy akumulatora na poziomie ogniw i zdolne do inteligentnego kontrolowania procesu ładowania i rozładowywania. Wydajność takich systemów BMS stosowanych z akumulatorami

kwasowo-ołowiowymi jest pooddawana w wątpliwość (stąd rzadko się je stosuje, aby uniknąć dodatkowych kosztów), lecz w przypadku systemów litowo-jonowych są one istotnie niezbędne.

System BMS zapewniający bezpieczeństwo systemów litowo-jonowych musi pełnić co najmniej następujące funkcje:

- monitorować napięcie poszczególnych ogniw i sygnalizować zakończenie rozładowywania, gdy tylko napięcie pojedynczego ogniwa spadnie poniżej progu napięcia rozładowania;
- za pomocą tej samej funkcji monitorowania sygnalizować redukcję szybkości ładowania bądź zakończenie ładowania, gdy tylko napięcie pojedynczego ogniwa osiągnie maksymalną wartość napięcia ładowania;
- monitorować prąd ładowania i rozładowania poszczególnych szeregów ogniw i sygnalizować jego redukcję, gdy wartości znamionowe prądu ładowania lub rozładowywania zostały przekroczone;
- monitorować temperaturę akumulatora i odpowiednio dostosowywać wartości graniczne prądu ładowania i rozładowania;
- rozłączyć akumulator w przypadku przeładowania lub nadmiernego rozładowania;
- rozłączyć akumulator w przypadku podjęcia próby ładowania lub rozładowania w temperaturze wykraczającej poza zakres przyjętych wartości granicznych.

Aby zapewnić długi okres eksploatacji i wysoką wydajność akumulatora, a także efektywnie wykorzystać jego pojemność, z systemem BMS muszą być zintegrowane następujące funkcje:

- monitorowanie temperatury akumulatora i przesyłanie sygnałów do systemu ogrzewania/chłodzenia, aby utrzymać temperaturę w zalecanych zakresie;
- wyrównywanie stanu naładowania akumulatora poprzez równoważenie naładowania poszczególnych ogniw, aby utrzymać optymalne wykorzystanie pojemności akumulatora;
- dokładne szacowanie stanu naładowania systemu w oparciu o historię ładowania i rozładowywania oraz napięcie ogniw;
- dostarczanie danych o parametrach roboczych akumulatora do innych systemów;
- szacowanie pozostałej pojemności (stanu zużycia) akumulatora.

W przypadku mniejszych systemów magazynowania energii system BMS może mieć postać pojedynczego obwodu drukowanego zawierającego wszystkie funkcje. W większych systemach magazynowania energii często stosuje się modułowe systemy BMS. Napięcie i temperatura ogniw są monitorowane przez moduł znajdujący się wewnątrz zespołu ogniw, a za funkcje na wyższym poziomie, takie jak obliczanie stanu naładowania i obsługa styczników na poziomie akumulatora, odpowiada centralny sterownik. Dzięki zastosowaniu najnowocześniejszych elementów i dedykowanych układów scalonych monitorujących ogniwa te funkcje monitorowania i kontroli można wdrożyć w sposób ekonomiczny, przy minimalnym zużyciu mocy. Takie najnowocześniejsze elementy to m.in. potężne wbudowane procesory ARM zużywające jedynie ułamek wata mocy, wyposażone w zaawansowane funkcje zarządzania energią.

WNIOSKI

Dobranie rozmiarów systemu magazynowania energii zapewniających wysoką efektywność gwarantuje również długi okres eksploatacji. Wysoka efektywność oznacza mniejszą stratę energii w postaci ciepła, a tym samym dłuższy okres eksploatacji wszystkich elementów (zarówno akumulatorów, jak i przetworników) ze względu na niższą temperaturę roboczą. Wymagania dotyczące chłodzenia również są wówczas mniejsze, co dodatkowo zwiększa efektywność energetyczną i zmniejsza koszty eksploatacji. Sam akumulator także ma wpływ na efektywność energetyczną. Akumulator do zastosowań wymagających cykli ładowania i rozładowania, w którym reakcje uboczne ograniczono do minimum, naturalnie będzie cechować mniejsza strata energii. Z kolei redukcja szybkości reakcji ubocznych to jeden z mechanizmów skutkujących wydłużeniem żywotności akumulatora.

Konwencjonalne akumulatory kwasowo-ołowiowe na ogół nie sprawdzają się w zastosowaniach innych niż zasilacze UPS. W przypadku tych akumulatorów niskie koszty początkowe nie rekompensują krótkiego okresu eksploatacji w przeliczeniu na cykle przy jakiegokolwiek istotnej głębokości rozładowania. Do tego dochodzi strata energii związana z ciągłą reakcją przeładowania zachodzącą podczas ładowania płynnego w trybie gotowości i wynikające stąd wymagania dotyczące wentylacji. Gdy stan naładowania przez dłuższy czas wynosi poniżej 100%, główną przyczyną starzenia się akumulatora staje się zasiarczenie, skutkujące przedwczesnym zmniejszeniem pojemności.

W przypadku magazynowania energii do celów wspomagania sieci energetycznej zdolność ładowania (poboru energii) jest równie ważna jako zdolność rozładowania. Z tymi zadaniami zwykle najlepiej radzi sobie akumulator, którego średni stan naładowania podczas pracy wynosi 50%. Tego typu zastosowania pozwalają na pełne wykorzystanie zalet akumulatora litowo-jonowego. W akumulatorach litowo-jonowych, których stan naładowania wynosi około 50%, nie zachodzą prawie żadne reakcje uboczne, a przy tym akumulatory te cechuje wysoka efektywność energetyczna. Nic więc dziwnego, że to właśnie te akumulatory są obecnie stosowane do celów wspomagania sieci energetycznej. Ich wydajność jest na tyle wysoka, że warto zastosować przetwornik najnowszej generacji, aby zapewnić wysoką wydajność całego systemu.

Informacje zawarte w niniejszej notce aplikacyjnej (a w szczególności we wnioskach) są ściśle związane z aktualnym rozwojem technologii akumulatorów oraz nowymi rozwiązaniami, które zostaną wprowadzone na rynek w najbliższej przyszłości, jak również wymaganiami rynku magazynowania energii. Zatem niniejsza publikacja może przedstawiać jedynie zarys ogólnej sytuacji w momencie jej przygotowywania. Choć na horyzoncie co pewien czas pojawiają się coraz to nowe obiecujące technologie, jak dotąd żadna z nich nie cieszy się równie dużym zainteresowaniem na rynku jak akumulatory litowo-jonowe.

ŹRÓDŁA

1	DNV GL RP 0043, https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2015-12/DNVGL-RP-0043.pdf
2	Linden, Reddy: Handbook of Batteries
3	Hoppecke: Blei-Fibel
4	IEC 60896-y
5	X. Luo i in. / Applied Energy 137 (2015) 511–536
6	IEC 62485-2: Wymagania bezpieczeństwa dotyczące akumulatorów i ich instalowania — Część 2: Akumulatory stacjonarne
7	http://www.ngk.co.jp/english/announce/
8	http://www.mpoweruk.com
9	IEC 62933-1 Wyd. 1 Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 1: Terminologia CDV
10	Leonardo Energy — Application Note: <i>Behind the Meter Energy Storage Systems for Renewables Integration (Instrukcje użytkowania: Scalenie systemów magazynowania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych działających „poza licznikiem”)</i> , Sam Jaffe, Cairn Energy Research Advisors, październik 2016

ZAŁĄCZNIK: STOSOWANE NORMY

W niniejszym załączniku przedstawiono wybrane normy odnoszące się do stacjonarnych systemów magazynowania energii. Lista jest ograniczona do norm poziomu systemu, ogniwa i wydajności. Bardziej szczegółowa i regu - larnie aktualizowana lista jest dostępna w publikacji DNV GL RP 0043 (1).

Normy systemowe

IEC 62619 (w opracowaniu, oczekiwana publikacja w 2017 r.): Ogniwa i baterie zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Wymagania bezpieczeństwa dotyczące akumulatorów litowych i baterii mających za-stosowanie w przemyśle

IEC 62619 (w opracowaniu, oczekiwana publikacja w 2017 r.): Ogniwa i baterie zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Wymagania bezpieczeństwa dotyczące akumulatorów litowych i baterii mających za-stosowanie w przemyśle

IEC 62620 (2014): Ogniwa wtórne i baterie zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Ogniwa wtórne i baterie litowe do zastosowań przemysłowych

IEC 61427-1: Wtórne ogniwa i akumulatory wykorzystywane w celu magazynowania energii w systemach energetyki odnawialnej — Wymagania ogólne i metody badań — Część 1: Zastosowanie w systemach fotowoltaicznych nie podłączonych do publicznej sieci energetycznej

IEC 61427-2: Akumulatory do magazynowania energii odnawialnej — Wymagania ogólne i metody badań — Część 2: Zastosowanie w systemach podłączonych do publicznej sieci energetycznej

IEEE 1375: IEEE Guide for the Protection of Stationary Battery Systems (Poradnik instytutu IEEE dotyczący ochrony systemów akumulatorów stacjonarnych)

IEEE 1491: IEEE Guide for Selection and Use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Applications (Poradnik instytutu IEEE dotyczący wyboru i użytkowania sprzętu monitorującego akumulatory w zastosowaniach stacjonarnych)

IEEE 1679: IEEE Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Emerging Energy Storage Technologies in Stationary Applications (Praktyki zalecane przez instytut IEEE w zakresie charakteryzacji i oceny powstających technologii magazynowania energii w zastosowaniach stacjonarnych)

IEEE 484: Recommended Practice for Installation and Design of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications (Zalecane praktyki w zakresie instalacji i projektowania akumulatorów kwasowo ołowiowych typu otwartego do zastosowań stacjonarnych)

IEEE P2030.3: Standard for Test Procedures for Electric Energy Storage Equipment and Systems for Electric Power Systems Applications (Norma dotycząca procedur testowania urządzeń magazynujących energię elektryczną i systemów do zastosowań w układach elektroenergetycznych)

Dokumenty robocze dotyczące normy IEC TC 120: Systemy magazynowania energii elektrycznej — normy z serii IEC 62933:

IEC 62933-1 (w trakcie opracowania): Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 1: Termin-ologia

IEC 62933-2-1 (w trakcie opracowania): Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 2-1: Parametry jednostkowe i metody badań — Specyfikacja ogólna

IEC 62933-3-1 (w trakcie opracowania): Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 3-1: Planowanie i instalacja — Specyfikacja ogólna

IEC TS 62933-4-1 (w trakcie opracowania): Electrical Energy Storage (EES) systems—Part 4-1: Guidance on environmental issues (Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 4-1: Wytyczne środowiskowe)

IEC TS 62933-5-1 (w trakcie opracowania): Electrical Energy Storage (EES) systems—Part 5-1: Safety considerations related to grid integrated electrical energy storage (EES) systems (Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 5-1: Kwestie bezpieczeństwa powiązane z siecią zintegrowanych systemów magazynowania energii elektrycznej (EES))

IEC 62933-5-2 (w trakcie opracowania): Electrical Energy Storage (EES) systems—Part 5-2: Safety considerations related to grid integrated electrical energy storage (EES) systems—Batteries (Systemy magazynowania energii elektrycznej (EES) — Część 5-1: Kwestie bezpieczeństwa powiązane z systemami magazynowania energii elektrycznej (EES) podłączonymi do sieci — Baterie)

ANSI/CAN/UL-9540: 2016 Standard for Safety, Energy Storage Systems and Equipment (under continuous maintenance) (Norma dotycząca bezpieczeństwa, systemów oraz sprzętu do magazynowania energii elektrycznej (pod konserwacją ciągłą)) — niniejsza norma służy do testowania, a następnie certyfikacji systemów magazynowania energii pod względem bezpieczeństwa.

2018 Międzynarodowy Kodeks Przeciwożarowy, Międzynarodowa Rada Przepisów

2018 Międzynarodowy Kodeks Budowlany, Międzynarodowa Rada Przepisów

2018 Międzynarodowy Kodeks Mieszkaniowy, Międzynarodowa Rada Przepisów

NFPA 1-2017 Fire Code (Kodeks Przeciwożarowy)

NFPA 70-2017 National Electrical Code (Krajowy Kodeks Elektryczny)

NFPA 855, Standard for the Installation of Energy Storage Systems (Norma dotycząca instalacji systemów magazynowania energii elektrycznej) (wersja wstępna, w trakcie opracowania)

Normy dotyczące ogniów

IEC 60622: Ogniwa i baterie wtórne zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Pojedyncze ogniwa akumulatorowe niklowo-kadmowe, szczelnie zamknięte, prostopadłościennie

IEC 60623: Ogniwa i baterie wtórne zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Pojedyncze ogniwa akumulatorowe, niklowo-kadmowe, prostopadłościennie, otwarte

IEC 60896-11: Baterie ołowiowe stacjonarne — Część 11: Typy otwarte — Ogólne wymagania i metody badań IEC 60896-21: Baterie ołowiowe stacjonarne — Część 21: Typy wyposażone w zawory — Metody badań

IEC 60896-22: Baterie ołowiowe stacjonarne — Część 22: Typy wyposażone w zawory — Wymagania

IEC 62133-1 i -2 (2017) (2012): Ogniwa i baterie wtórne zawierające zasadowe lub inne niekwasowe elektrolity — Wymagania bezpieczeństwa dla przenośnych ogniów wtórnych oraz baterii z nich wykonanych do użytkowania w zastosowaniach przenośnych, bezpieczeństwo przeciwwybuchowe

IEEE 1184: IEEE Guide for Batteries for Uninterruptable Power Supply Systems Performance (Poradnik instytutu IEEE dotyczący akumulatorów stosowanych w zasilaczach awaryjnych)

IEEE 1361: IEEE Guide for Selection, Charging, Test, and Evaluation of Lead Acid Batteries used in Stand Alone PV Systems (Poradnik instytutu IEEE dotyczący doboru, ładowania, testowania i oceny akumulatorów kwasowo-ołowiowych stosowanych w autonomicznych systemach fotowoltaicznych)

IEEE 1660: IEEE Guide for Application and Management of Stationary Batteries Used in Cycling Service (Poradnik instytutu IEEE dotyczący stosowania i zarządzania akumulatorami stacjonarnymi używanymi w trybie pracy ciągłej)

IEEE 1661: IEEE Guide for Test and Evaluation of Pb-Acid Batteries used in PV Hybrid Power Systems (Poradnik instytutu IEEE dotyczący testowania i oceny akumulatorów kwasowo-ołowiowych stosowanych w hybrydowych systemach fotowoltaicznych)

UL 1642: Lithium Batteries (Baterie litowe)

UL 1973: Batteries for Use in Light Electric Rail (LER) Applications and Stationary Applications (Akumulatory stosowane w systemach lekkiej kolei elektrycznej (LER, Light Electric Rail) i aplikacjach stacjonarnych)

UL 1974: Evaluation for Repurposing of Batteries (Ocena akumulatorów pod kątem ponownego użycia) (pierwsza edycja, w trakcie opracowania)

UL 2054: Household and Commercial Batteries (Akumulatory do użytku domowego i komercyjnego)

UN 3292: Batteries, Containing Sodium (Akumulatory zawierające sód)

IEC 62660-1: Baterie wtórne do napędu elektrycznych pojazdów drogowych — Część 1: Badanie własności ogniw litowo-jonowych

IEC 62660-2 (2010): Baterie wtórne do napędu elektrycznych pojazdów drogowych — Część 2: Badania niezawodności i niepożądanego działania ogniw litowo-jonowych

IEC 62660-3 (w trakcie opracowania): Akumulatory litowo-jonowe do napędu pojazdów elektrycznych — Część 3: Wymagania bezpieczeństwa

SAE J2185: Life Test for Heavy-Duty Storage Batteries (Test żywotności akumulatorów o wysokiej obciążalności)

SAE J2288: Life Cycle Testing of Electric Vehicle Battery Modules (Testowanie cyklu życia modułów akumulatorowych stosowanych w pojazdach o napędzie elektrycznym)

SAE J240: Life Test for Automotive Storage Batteries (Test żywotności akumulatorów do zastosowań motoryzacyjnych)

SAE J2464: Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing (Testowanie bezpieczeństwa i nieprawidłowego użytkowania układu magazynowania energii wielokrotnego ładowania (RESS) w pojazdach z napędem elektrycznym i hybrydowym)

SAE J2929: Electric and Hybrid vehicle propulsion battery system safety standard—lithium-based rechargeable cells (Norma bezpieczeństwa systemu napędzania pojazdów z napędem elektrycznym i hybrydowym — akumulatory)

UL 2580: Batteries for use in electric vehicles (Akumulatory do pojazdów z napędem elektrycznym)

Elementy i technologie systemów magazynowania energii elektrycznej (ees)

UL 810A: Electrochemical Capacitors (Kondensatory elektrochemiczne)

IEC 62813 Kondensatory litowo jonowe do stosowania w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych — Metody badań charakterystyk elektrycznych

Flow batteries—Guidance on the specification, installation and operation (Akumulatory przepływowe — Przewodnik specyfikacyjny, instalacyjny i obsługowy), Porozumienie Warsztatowe, CWA 50611, kwiecień 2013

IEC 62932-1 (w trakcie opracowania): Secondary Cells and Batteries of the Flow Type: Flow Batteries —Guidance on the Specification, Installation and Operation (Ogniwa i baterie wtórne typu przepływowego: Akumulatory przepływowe — Przewodnik specyfikacyjny, instalacyjny i obsługowy)

IEC 62932-2-1 (w trakcie opracowania): Flow batteries—General requirement and test method of vanadium flow batteries (Akumulatory przepływowe — Wymagania ogólne i metoda badania przepływowych akumulatorów wanadowych)

IEC 62932-2-2 (w trakcie opracowania): Flow Battery Technologies—Safety (Technologie akumulatorów przepływowych — Bezpieczeństwo)

IEC 60034-1: Maszyny elektryczne wirujące — Część 1: Dane znamionowe i parametry

IEC 11439 Wysokociśnieniowe butle do gazu ziemnego stosowane jako zbiorniki paliwa pojazdów samochodowych

Przepisy ASME dotyczące kotłów i zbiorników ciśnieniowych, sekcja VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels (Przepisy dotyczące konstrukcji kotłów i zbiorników ciśnieniowych)

EN 13445 Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe (norma zharmonizowana z Dyrektywą w sprawie urządzeń ciśnieniowych (97/23/WE))

Wydajność

Wymagania funkcjonalne dotyczące zastosowań magazynowania energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych, Instytut Electric Power Research Institute (EPRI)

PNNL 22010-rev 2: Protocol for Uniformly Measuring and Expressing Performance of Energy Storage Systems (Protokół dotyczący pomiaru i wyrażania wydajności systemów magazynowania energii w sposób jednolity) (20122016)