

Wielkoskalowe magazyny energii – dobór parametrów, technologia i bezpieczeństwo pracy systemu

Tytuł referatu

Krzysztof Strukowicz – Polska Izba Magazynowania Energii i Elektromobilności, Corab Energy Storage

Streszczenie

Referat przedstawia kompleksowe zagadnienia związane z projektowaniem, doбором i bezpieczną eksploatacją wielkoskalowych stacjonarnych magazynów energii elektrycznej (BESS). Szczególną uwagę poświęcono technologii litowo żelazowo fosforanowej (LFP) jako dominującemu rozwiązaniu rynkowemu, metodologii doboru mocy i pojemności w odniesieniu do Punktu Poboru Energii (PPE), analizie ekonomicznej w ujęciu LCOS, a także zagadnieniom bezpieczeństwa termicznego, pożarowego i cyberbezpieczeństwa wynikającym z dyrektywy NIS 2. W referacie zaprezentowano podejście projektowe oparte na rzeczywistej energii dostępnej w PPE oraz doświadczeniach eksploatacyjnych z rynku europejskiego.

1. Wstęp

Transformacja energetyczna oraz rosnący udział niestabilnych odnawialnych źródeł energii powodują istotne zmiany w pracy krajowych i lokalnych systemów elektroenergetycznych. Wymagania operatorów sieci dystrybucyjnych i przesyłowych w zakresie jakości energii, regulacji mocy biernej oraz elastyczności systemowej sprawiają, że magazyny energii stają się elementem infrastruktury krytycznej, a nie wyłącznie dodatkiem do instalacji OZE. Projektowanie BESS wymaga dziś nie tylko wiedzy elektroenergetycznej, lecz również uwzględnienia ekonomiki cyklu życia, bezpieczeństwa funkcjonalnego, termicznego i cybernetycznego.

2. Technologie wielkoskalowych magazynów energii

2.1. Porównanie technologii i pozycja LFP

Na rynku magazynów energii funkcjonuje kilka technologii bateryjnych, jednak w rozwiązaniach wielkoskalowych dominującą pozycję zajmuje technologia LFP. Wynika to z jej wysokiej odporności termicznej, niskiej podatności na zjawisko thermal runaway oraz stabilnych parametrów w długim horyzoncie czasowym.

LFP zapewnia długą żywotność cykliczną przy codziennej pracy, co jest kluczowe w zastosowaniach takich jak arbitraż cenowy, usługi systemowe czy redukcja mocy zamówionej. Technologia ta charakteryzuje się również przewidywalną degradacją pojemności, co znacząco ułatwia projektowanie systemów na pełny okres eksploatacji.

3. Analiza ekonomiczna magazynów LFP

3.1. LCOS jako kluczowy wskaźnik opłacalności

W przypadku magazynów energii podstawowym wskaźnikiem ekonomicznym jest LCOS (Levelized Cost of Storage), uwzględniający całkowite koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne, straty energetyczne oraz degradację pojemności w czasie. Dla typowych magazynów LFP, przy CAPEX rzędu 115 EUR/kWh, dwudziestoletniej żywotności i codziennym cyklowaniu, techniczny koszt energii oddanej do sieci kształtuje się na poziomie około 3,15 eurocenta/kWh.

3.2. Strumienie przychodów

Magazyny energii umożliwiają generowanie przychodów z wielu niezależnych źródeł, takich jak arbitraż cenowy na rynkach day ahead i intraday, świadczenie usług systemowych (FCR, aFRR, mFRR), peak shaving czy optymalizacja autokonsumpcji energii z OZE. Kluczową zaletą niskiego LCOS jest możliwość osiągania dodatniej marży przy każdej cenie energii przekraczającej koszt techniczny jej magazynowania.

4. Dobór mocy magazynu energii

Dobór mocy magazynu energii stanowi jeden z kluczowych elementów projektowania instalacji BESS, mający bezpośredni wpływ na możliwość spełnienia warunków przyłączeniowych, bezpieczeństwo eksploatacji oraz opłacalność inwestycji. W praktyce projektowej najczęstszym błędem jest utożsamianie mocy nominalnej urządzeń magazynu energii z mocą dostępną w Punkcie Poboru Energii (PPE). Takie podejście prowadzi do niedoszacowania mocy instalacji i w konsekwencji do problemów z jej odbiorem technicznym oraz eksploatacją.

4.1. Punkt Poboru Energii (PPE) jako punkt referencyjny

PPE stanowi formalny punkt odniesienia dla operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) lub przesyłowego (OSP). To właśnie w PPE:

- Weryfikowana jest moc czynna oddawana lub pobierana przez magazyn energii.
- Rozliczana jest moc bierna.
- Kontrolowany jest współczynnik mocy ($\cos \varphi$).
- Oceniana jest zgodność pracy instalacji z wydanymi warunkami przyłączeniowymi.

Parametry elektryczne urządzeń magazynu energii (PCS, transformator, aparatura AC/DC) nie są rozpatrywane indywidualnie, lecz wyłącznie przez pryzmat parametrów uzyskanych w PPE. Oznacza to, że projekt magazynu musi zapewnić spełnienie wszystkich wymagań właśnie w tym punkcie, a nie na wyjściu przekształtnika czy na zaciskach transformatora.

4.2. Straty mocy w torze od magazynu do PPE

Na drodze pomiędzy magazynem energii a PPE występuje szereg elementów powodujących straty mocy czynnej i wpływających na bilans mocy biernej:

- Transformator – straty jałowe i obciążeniowe, typowo 1–1,5 % mocy znamionowej.
- Linia przyłączeniowa – straty rezystancyjne zależne od długości kabla, przekroju i poziomu napięcia, rzędu 0,5–2 %.
- Przekształtniki energoelektroniczne – ograniczenia mocy przy wysokiej temperaturze oraz przy pracy z dużą składową mocy biernej.

Dodatkowo transformator oraz linia powodują zapotrzebowanie na moc bierną, co wpływa na dostępny zapas mocy czynnej, szczególnie przy wymaganym warunku $\cos \varphi \geq 0,95$ w PPE.

4.3. Wpływ regulacji mocy biernej na dostępną moc czynną

Magazyny energii coraz częściej zobowiązane są do aktywnej regulacji mocy biernej, zarówno w trybie stałego $\cos \varphi$, jak i w funkcji napięcia. Realizacja tej funkcji odbywa się kosztem części mocy pozornej dostępnej przekształtnika.

W praktyce oznacza to, że:

- Przy generowaniu lub absorpcji mocy biernej zmniejsza się maksymalna dostępna moc czynna.
- Przy skrajnych warunkach napięciowych magazyn może nie być w stanie oddać deklarowanej mocy czynnej, jeśli nie został odpowiednio przewymiarowany.

Z tego względu moc znamionowa PCS oraz całego układu musi uwzględniać jednoczesną pracę z mocą czynną i bierną w warunkach wymaganych przez OSD/OSP.

4.4. Przewymiarowanie mocy – perspektywa projektowa i inwestorska

Świadome przewymiarowanie mocy magazynu energii względem mocy wymaganej w PPE jest elementem poprawnego projektu, a nie błędem projektowym. W praktyce przewymiarowanie:

- Kompensuje straty mocy w torze energetycznym.
- Zapewnia spełnienie warunków przyłączeniowych w pełnym zakresie temperatur.
- Umożliwia stabilną regulację mocy biernej.
- Ogranicza ryzyko redukcji mocy przez operatora.
- Zwiększa dostępność magazynu w długim okresie eksploatacji.

Z perspektywy inwestora przewymiarowanie mocy:

- Zmniejsza ryzyko kar umownych.
- Ogranicza konieczność kosztownych modernizacji w przyszłości.
- Zwiększa pewność realizacji zakontraktowanych usług systemowych i rynkowych.

4.5. Wpływ warunków środowiskowych i starzenia urządzeń

Moc dostępna z magazynu energii podlega ograniczeniom wynikającym z:

- Temperatury otoczenia.
- Temperatury elementów mocy PCS.
- Starzenia się komponentów energoelektronicznych.
- Zmian parametrów transformatora w czasie.

Wysoka temperatura otoczenia lub nieoptymalne warunki chłodzenia mogą prowadzić do czasowego deratingu przekształtników, co bez odpowiedniego zapasu mocy skutkuje niespełnieniem parametrów w PPE.

4.6. Podsumowanie zasad doboru mocy

Podsumowując, prawidłowy dobór mocy magazynu energii powinien:

- Być odniesiony do PPE jako jedyne punktu weryfikacji.
- Uwzględniać straty transformatora i linii.
- Obejmować zapas mocy na regulację mocy biernej.
- Uwzględniać wpływ temperatury i starzenia urządzeń.
- Zawierać świadome przewymiarowanie jako element bezpieczeństwa technicznego i biznesowego.

Takie podejście pozwala zapewnić długoterminową, stabilną i zgodną z wymaganiami sieci pracę wielkoskalowych magazynów energii, minimalizując ryzyka techniczne i finansowe inwestycji.

5. Dobór pojemności magazynu energii

Dobór pojemności magazynu energii jest drugim – obok doboru mocy – fundamentalnym etapem projektowania instalacji BESS. W praktyce rynkowej pojęcie „pojemności magazynu” bywa mylnie utożsamiane z pojemnością nominalną zestawu baterii wynikającą z deklaracji producenta. Takie podejście prowadzi do istotnych błędów projektowych, ponieważ nie uwzględnia rzeczywistej energii dostępnej w Punkcie Poboru Energii (PPE), strat energetycznych toru mocy oraz degradacji pojemności w czasie.

Celem prawidłowego doboru pojemności magazynu energii jest zapewnienie wymaganej ilości energii użytkowej w PPE przez cały okres eksploatacji, w tym również na końcu życia systemu (EoL – End of Life).

5.1. Pojemność nominalna a energia użytkowa w PPE

Pojemność nominalna baterii określa całkowitą ilość energii zgromadzonej w ogniwach przy warunkach referencyjnych. Nie jest ona jednak równoznaczna z ilością energii, którą magazyn może rzeczywiście oddać do sieci lub odbioru końcowego.

Na drodze od ogniw bateryjnych do PPE energia przepływa przez kolejne elementy systemu:

- System zarządzania baterią (BMS).
- Przekształtnik energoelektroniczny (PCS).
- Transformator.
- Linię przyłączeniową.

Każdy z tych elementów wprowadza straty, które sumarycznie powodują, że energia dostępna w PPE jest istotnie niższa od energii zgromadzonej w ogniwach. Z tego względu projektowanie pojemności musi być prowadzone w oparciu o bilans energetyczny całego toru, a nie wyłącznie o dane katalogowe baterii.

5.2. Bilans energetyczny i straty

Bilans energetyczny magazynu energii powinien uwzględniać:

- Sprawność PCS.
- Straty transformatora.
- Straty linii.
- Ograniczenia wynikające z algorytmów BMS.

Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że sprawności poszczególnych elementów nie są stałe i mogą ulegać zmianie w funkcji obciążenia, temperatury oraz starzenia się urządzeń. W praktyce projektowej stosuje się wartości konserwatywne, zapewniające zachowanie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa energetycznego.

5.3. Głębokość rozładowania (DoD) jako parametr projektowy

Jednym z kluczowych parametrów wpływających na rzeczywistą energię użytkową magazynu jest głębokość rozładowania (DoD – Depth of Discharge). DoD określa, jaka część nominalnej pojemności ogniw może być wykorzystana w pojedynczym cyklu pracy.

Dla technologii LFP charakterystyczne jest, że:

- Obszar pracy przy DoD 80% znajduje się w najbardziej liniowej części charakterystyki rozładowania.
- Napięcie ogniw zmienia się w tym zakresie w sposób stabilny.
- Producenci gwarantują w tym obszarze największą liczbę cykli.

Praca przy głębszych rozładowaniach (DoD 90% i więcej):

- Zwiększa energię jednorazowo dostępną.
- Prowadzi do pracy w nieliniowych fragmentach charakterystyki.
- Zwiększa ryzyko braku pełnego balansowania ogniw.
- Zwiększa ryzyko statystycznego wyłączenia pojedynczych ogniw w dużych stringach.

Z tego względu DoD 80% powinno być traktowane jako wartość podstawowa dla projektów wielkoskalowych, a wyższe wartości jedynie jako wariant specjalny, wymagający indywidualnej analizy ryzyka.

5.4. Degradacja pojemności i projektowanie na EoL

Pojemność ogniw litowych ulega stopniowej degradacji w trakcie eksploatacji. Nawet przy optymalnych warunkach pracy pojemność dostępna na końcu życia systemu wynosi typowo 65–75% wartości początkowej.

Prawidłowy dobór pojemności magazynu energii musi:

- Uwzględniać założoną degradację pojemności.
- Zapewniać spełnienie wymagań energetycznych na końcu życia systemu, a nie tylko w momencie uruchomienia.

W praktyce oznacza to, że pojemność początkowa (BoL – Beginning of Life) musi być odpowiednio większa niż pojemność wymagana w stanie EoL. Jest to kluczowe z punktu widzenia realizacji kontraktów rynkowych, takich jak rynek mocy czy usługi systemowe, gdzie niedostarczenie energii w zadanym czasie skutkuje sankcjami finansowymi.

5.5. Metodologia doboru pojemności

Dobór pojemności magazynu energii można opisać zależnością:

Pojemność początkowa magazynu =

wymagana energia w PPE / (DoD · sprawność PCS · sprawność transformatora · sprawność linii · współczynnik degradacji)

Takie podejście:

- Uwzględnia wszystkie istotne straty i ograniczenia.
- Zapewnia spełnienie wymagań energetycznych w całym okresie eksploatacji.
- Eliminuje ryzyko niedowymiarowania magazynu.

5.6. Wpływ profilu pracy magazynu

Profil pracy magazynu (liczba cykli, czas trwania cyklu, tryb pracy ciągłej lub interwałowej) ma istotny wpływ na rzeczywiste wykorzystanie pojemności. Magazyny pracujące codziennie w cyklach 2, 4 lub 6 godzinnych wymagają szczególnie konserwatywnego podejścia do doboru pojemności, ponieważ:

- Pracują blisko granic możliwości system.
- Są bardziej wrażliwe na degradację i odchylenia temperaturowe.
- Muszą zachować pełną dostępność przez cały okres kontraktowy.

5.7. Znaczenie prawidłowego doboru pojemności

Prawidłowy dobór pojemności magazynu energii:

- Zapewnia realizację funkcji systemowych i rynkowych.
- Zwiększa przewidywalność pracy instalacji.
- Ogranicza ryzyko operacyjne i finansowe.
- Umożliwia długoterminowe planowanie eksploatacji.

Niedowymiarowanie pojemności prowadzi natomiast do:

- Skróconego czasu pracy przy wymaganej mocy.
- Niespełnienia zobowiązań kontraktowych.
- Przyspieszonego zużycia baterii.
- Utraty zaufania operatorów sieci i rynku.

5.8. Podsumowanie doboru pojemności

Dobór pojemności magazynu energii powinien być procesem analitycznym opartym na rzeczywistej energii dostępnej w PPE, uwzględniającym straty, DoD oraz degradację pojemności w czasie. Tylko takie podejście pozwala zaprojektować magazyn energii jako stabilny, przewidywalny i bezpieczny element systemu elektroenergetycznego.

6. Bezpieczeństwo termiczne magazynów energii

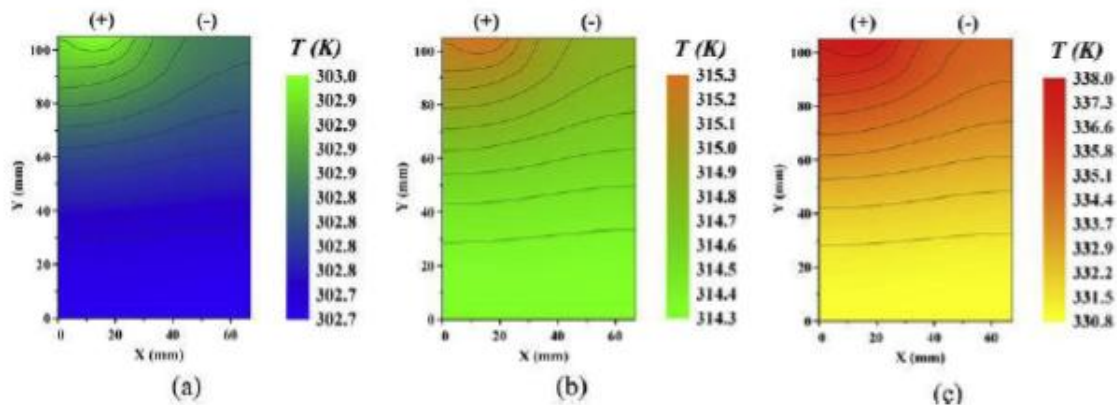
Bezpieczeństwo termiczne stanowi jeden z najistotniejszych aspektów projektowania i eksploatacji wielkoskalowych magazynów energii. Temperatura pracy ogniw litowych bezpośrednio wpływa na ich żywotność, sprawność energetyczną, stabilność parametrów elektrycznych oraz poziom bezpieczeństwa pożarowego. W systemach BESS kluczowe znaczenie ma nie tylko utrzymanie średniej temperatury w dopuszczalnym zakresie, lecz przede wszystkim ograniczenie lokalnych przegrzewów oraz gradientów temperatury pomiędzy poszczególnymi ogniwami, modułami i stringami.

6.1. Źródła generacji ciepła w magazynach energii

Ciepło w magazynie energii generowane jest w wielu miejscach toru energetycznego, w szczególności:

- W samych ogniwach bateryjnych w wyniku strat rezystancyjnych.
- W punktach połączeń elektrycznych: terminalach, szynach prądowych i złączach.
- W elementach mocy przekształtnika przy pracy z wysokim prądem.
- W transformatorze i aparaturze AC przy obciążeniach bliskich mocy znamionowej.

Co istotne, źródła te nie są rozmieszczone równomiernie, dlatego lokalne hotspoty mogą występować nawet przy prawidłowej średniej temperaturze wewnątrz obudowy BESS.



Rys. 1. Rozkład temperatury na przykładowym ogniwie akumulatora przy prądzie (a) 0,25C, (b) 0,5C, (c) 1,0C

6.2. Znaczenie jednorodności temperatury

Jednorodny rozkład temperatury w obrębie ogniw i modułów jest warunkiem:

- Stabilnej pracy algorytmów BMS.
- Prawidłowego balansowania ogniw.
- Przewidywalnej degradacji pojemności.
- Ograniczenia ryzyka awarii punktowych.

Niejednorodność temperaturowa powoduje różnice w rezystancji wewnętrznej ogniw, co prowadzi do ich nierównomiernego obciążania i przyspieszonego starzenia najsłabszych elementów systemu. W skrajnych przypadkach może to inicjować lokalne stany niebezpieczne.

6.3. Chłodzenie powietrzem w magazynach wielkoskalowych

Dla stacjonarnych magazynów energii pracujących przy umiarkowanym C rate (typowo do 0,5C) chłodzenie powietrzem posiada istotne przewagi nad chłodzeniem cieczą. Do najważniejszych należą:

- Możliwość bezpośredniego odbioru ciepła z miejsc jego lokalnej generacji.
- Chłodzenie ogniw z wielu stron (góra, dół, boki).
- Skuteczna redukcja lokalnych hotspotów.
- Prostota konstrukcji i brak dodatkowej bariery przewodzenia ciepła.

Odpowiednio zaprojektowany system obiegu powietrza umożliwia osiągnięcie stabilnych warunków temperaturowych przy jednoczesnym ograniczeniu złożoności systemu i ryzyka awarii pomocniczych.

6.4. Rola izolacji obudowy BESS

Izolacja termiczna obudowy magazynu energii jest często niedocenianym, a kluczowym elementem bezpieczeństwa termicznego. Jej podstawową funkcją nie jest jedynie ochrona przed warunkami zewnętrznymi, lecz: Możliwość bezpośredniego odbioru ciepła z miejsc jego lokalnej generacji.

- Stabilizacja temperatury wewnętrznej.
- Ograniczenie wpływu temperatur ekstremalnych.
- Zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego systemów HVAC.
- Ograniczenie wahań temperatury w czasie cyklu dobowego.

Izolacja obudowy wpływa bezpośrednio na bilans energetyczny całego magazynu oraz na tempo degradacji ogniw.

Parametr	L – niska	M – średnia	H – wysoka	VH – bardzo wysoka
Współczynnik przenikania U [W/m²K]	≥ 1,0	0,5–1,0	0,25–0,5	< 0,25
Grubość izolacji [mm]	10–30	40–80	80–120	≥ 120
Stabilność temperatury wewnętrznej	Niska	Średnia	Wysoka	Bardzo wysoka
Zużycie energii HVAC	Bardzo wysokie	Średnie	Niskie	Bardzo niskie
Relacja CAPEX / OPEX	Niski / wysoki	Zrównoważona	Wyższy / niski	Najwyższy / najniższy
Zalecane zastosowanie	Klimaty łagodne	Minimum techniczne	Optymalne dla PL	Wysoka niezawodność

Tabela 1. Klasy izolacji obudów magazynów energii BESS

6.5. Wnioski projektowe dotyczące izolacji

Dla warunków klimatycznych Polski:

- Klasa M stanowi minimum techniczne.
- Klasa H jest optymalnym kompromisem pomiędzy CAPEX, OPEX i trwałością ogniw.
- Klasa VH powinna być stosowana w instalacjach o bardzo wysokich wymaganiach niezawodności lub niskiej tolerancji na przerwy w pracy.

Izolacja musi być projektowana łącznie z systemem HVAC oraz algorytmami pracy BMS – jako spójny system, a nie zbiór niezależnych komponentów.

7. Bezpieczeństwo funkcjonalne magazynów energii

Bezpieczeństwo funkcjonalne magazynu energii obejmuje zdolność systemu do przejścia w stan bezpieczny w każdej sytuacji awaryjnej, niezależnie od przyczyny zdarzenia. Dotyczy to zarówno usterek sprzętowych, błędów oprogramowania, zdarzeń środowiskowych, jak i incydentów cybernetycznych.

7.1. Architektura bezpieczeństwa funkcjonalnego

System BESS powinien być projektowany w architekturze wielowarstwowej, obejmującej:

- Zabezpieczenia sprzętowe (bezpieczniki, styczniki, rozłączniki).
- Zabezpieczenia funkcjonalne w BMS.
- Zabezpieczenia systemowe w EMS.
- Mechanizmy autonomiczne niezależne od komunikacji zewnętrznej.

Kluczowe jest zapewnienie, aby podstawowe funkcje bezpieczeństwa nie wymagały poprawnej pracy systemów wyższego poziomu ani dostępu do sieci komunikacyjnej.

7.2. Bezpieczne odłączanie stringów DC

Jednym z krytycznych elementów bezpieczeństwa funkcjonalnego jest zdolność systemu do:

- Szybkiego.
- Selektownego.
- Kontrolowanego.

odłączania całych stringów DC pod pełnym obciążeniem, niezależnie od stanu przekształtnika czy systemu EMS.

Rozwiązanie to:

- Ogranicza skutki zwarć i awarii lokalnych.
- Zwiększa bezpieczeństwo obsługi i służb ratowniczych.
- Zapobiega eskalacji zdarzeń do poziomu całej instalacji.

7.3. Tryby awaryjne i degradacyjne

Nowoczesny magazyn energii powinien posiadać zaprogramowane tryby:

- Bezpiecznego ograniczenia mocy.
- Kontrolowanego wygaszania pracy.
- Pracy autonomicznej w przypadku utraty łączności.

Takie podejście umożliwia utrzymanie kontroli nad instalacją nawet w sytuacjach częściowej utraty funkcjonalności systemu sterowania.

7.4. Powiązanie bezpieczeństwa funkcjonalnego i cybernetycznego

Bezpieczeństwo funkcjonalne i cyberbezpieczeństwo są ze sobą ściśle powiązane. System odporny funkcjonalnie musi:

- Zachowywać zdolność przejścia w stan bezpieczny nawet w przypadku cyberincydentu.
- Uniemożliwiać wykonanie poleceń niebezpiecznych z poziomu systemów zewnętrznych.
- Posiadać jasno zdefiniowane granice odpowiedzialności pomiędzy BMS, EMS i systemami operatorskimi.

7.5. Znaczenie bezpieczeństwa funkcjonalnego w eksploatacji

Właściwie zaprojektowane bezpieczeństwo funkcjonalne:

- Ogranicza ryzyko zdarzeń pożarowych.
- Minimalizuje skutki awarii sprzętowych i błędów ludzkich.
- Zwiększa dostępność magazynu.
- Redukuje koszty przestojów i ubezpieczenia.
- Wzmacnia zaufanie operatorów sieci oraz inwestorów.

8. Cyberbezpieczeństwo wielkoskalowych magazynów energii

Rozwój wielkoskalowych magazynów energii powoduje, że systemy BESS stają się integralną częścią infrastruktury krytycznej sektora energetycznego. Oznacza to, że oprócz bezpieczeństwa elektrycznego i pożarowego równie istotne staje się bezpieczeństwo cyfrowe, obejmujące systemy sterowania, komunikacji oraz przetwarzania danych. Współczesny magazyn energii jest systemem cyber fizycznym, w którym ingerencja w warstwę informatyczną może bezpośrednio wpłynąć na bezpieczeństwo pracy instalacji i stabilność sieci elektroenergetycznej.

8.1. Dyrektywa NIS 2 a magazyny energii

Dyrektywa NIS 2 (Network and Information Security 2) znacząco rozszerza zakres podmiotów objętych obowiązkami w zakresie cyberbezpieczeństwa w porównaniu do wcześniejszej dyrektywy NIS 1. W sektorze energetyki obejmuje ona m.in. wytwarzanie, dystrybucję oraz magazynowanie energii elektrycznej, kwalifikując operatorów magazynów energii jako podmioty kluczowe lub ważne, w zależności od skali działalności oraz znaczenia dla systemu.

Nowe regulacje wprowadzają obowiązek:

- Prowadzenia ciągłej analizy ryzyka cybernetycznego.
- Wdrożenia adekwatnych środków technicznych i organizacyjnych.
- Raportowania incydentów bezpieczeństwa w ściśle określonych terminach.
- Nadzoru nad bezpieczeństwem łańcucha dostaw.
- Osobistej odpowiedzialności członków zarządu za stan cyberbezpieczeństwa organizacji.

8.2. Architektura cyfrowa magazynu energii jako obszar ryzyka

Wielkoskalowy magazyn energii składa się z wielu warstw cyfrowych, które mogą stanowić potencjalne wektory ataku:

- System BMS (Battery Management System).
- System EMS (Energy Management System).
- Przekształtniki energoelektroniczne,
- Systemy SCADA i HMI.
- Infrastruktura komunikacyjna (LAN, WAN, LTE, VPN).
- Połączenia z systemami operatora sieci lub agregatora rynku mocy.

Każda z tych warstw przetwarza dane krytyczne, takie jak stany napięć, prądów, temperatur, algorytmy ładowania i rozładowania czy polecenia sterujące. Przejęcie kontroli nad którymkolwiek z tych elementów może prowadzić do:

- Niekontrolowanego rozładowania baterii.
- Przeciążenia urządzeń.
- Awaryjnego odłączenia magazynu od sieci.
- W skrajnym przypadku do uszkodzeń sprzętu lub zagrożenia pożarowego.

8.3. BMS jako kluczowy element bezpieczeństwa cybernetycznego

Najniższym poziomem cyfrowym magistrali sterowania w magazynie energii jest system BMS, który odpowiada za monitorowanie i ochronę pojedynczych ogniw oraz całych stringów bateryjnych. Z punktu widzenia cyberbezpieczeństwa szczególne znaczenie ma:

- Pochodzenie sprzętu i oprogramowania BMS.
- Transparentność architektury sprzętowej.
- Możliwość audytu kodu źródłowego.
- Zgodność z europejskimi standardami cyberbezpieczeństwa.

Praktyka rynkowa pokazuje istotne różnice pomiędzy rozwiązaniami opartymi na europejskim łańcuchu dostaw a systemami nieposiadającymi jawnej dokumentacji sprzętowej i programowej. Brak przejrzystości utrudnia ocenę podatności na cyberzagrożenia i stoi w sprzeczności z wymaganiami NIS 2 w zakresie kontroli dostawców.

8.4. Zarządzanie incydentami i ciągłość działania

Dyrektywa NIS 2 precyzyjnie definiuje harmonogram zgłaszania poważnych incydentów cyberbezpieczeństwa. Operator magazynu energii jest zobowiązany do:

- Zgłoszenia wstępnego incydentu w ciągu 24 godzin.
- Przedstawienia szczegółowego raportu w ciągu 72 godzin.
- Dostarczenia raportu końcowego w terminie do jednego miesiąca.

W kontekście magazynów energii kluczowe znaczenie ma zdolność systemu do pracy w trybie bezpiecznym również podczas incydentu cybernetycznego. Oznacza to, że funkcje ochronne, takie jak:

- awaryjne odłączanie stringów DC,
- ograniczenie mocy,
- kontrolowane wygaszenie pracy magazynu,

muszą działać niezależnie od systemów wyższego poziomu, takich jak EMS czy zdalna komunikacja.

8.5. Odpowiedzialność zarządcza i kompetencje personelu

Nowym elementem wprowadzonym przez NIS 2 jest bezpośrednia odpowiedzialność organów zarządzających za nadzór nad cyberbezpieczeństwem. W praktyce oznacza to:

- Konieczność regularnych szkoleń kadry zarządzającej.
- Wdrożenie procedur reagowania na incydenty.
- Okresowe audyty systemów cyfrowych magazynu energii.
- Dokumentowanie decyzji związanych z bezpieczeństwem IT/OT.

W ciągu pierwszych 24 miesięcy od wejścia w życie nowych przepisów w Polsce przewidziano moratorium na kary finansowe, co powinno zostać wykorzystane przez inwestorów i operatorów na pełne dostosowanie systemów magazynowania energii do nowych wymagań.

8.6. Cyberbezpieczeństwo jako element bezpieczeństwa technicznego

Cyberbezpieczeństwo magazynów energii nie może być traktowane jako zagadnienie wyłącznie informatyczne. Stanowi ono integralny element ogólnego bezpieczeństwa instalacji, wpływając bezpośrednio na:

- Bezpieczeństwo pracy ludzi.
- Ochronę mienia.
- Stabilność sieci elektroenergetycznej.
- Wiarygodność inwestycji w długim okresie eksploatacji.

Dlatego projektowanie BESS powinno uwzględniać cyberbezpieczeństwo już na etapie koncepcji technicznej i wyboru technologii, a nie jako element dodatkowy wdrażany po uruchomieniu instalacji.

8.7. Ryzyko luk bezpieczeństwa w systemach BMS i EMS

Systemy BMS i EMS, jako elementy sterujące i decyzyjne magazynów energii, stanowią newralgiczny punkt z punktu widzenia cyberbezpieczeństwa. W kontekście dyrektywy NIS 2 oraz rosnącego znaczenia bezpieczeństwa łańcucha dostaw coraz częściej analizowanym ryzykiem są luki bezpieczeństwa, tzw. backdoory, czyli celowo lub nieumyślnie pozostawione mechanizmy umożliwiające zdalny dostęp do systemu z pominięciem udokumentowanych kanałów sterowania. [brattle.com], [unece.org]

Luki bezpieczeństwa mogą występować zarówno:

- Na poziomie sprzętowym (ukryte układy scalone, dodatkowe moduły komunikacyjne).
- Jak i programowym (niewidoczne konta serwisowe, funkcje debug, ukryte API).

W systemach BMS i EMS ryzyko to jest szczególnie istotne, ponieważ systemy te:

- Posiadają bezpośredni wpływ na parametry pracy baterii.
- Są zdolne do inicjowania stanów awaryjnych (odłączenia, ograniczenia mocy).
- Często komunikują się z systemami nadrzędnymi operatorów sieci lub agregatorów rynku. [link.springer.com], [frontiersin.org]

8.8. Przykłady luk bezpieczeństwa w BMS i EMS

8.8.1. Ukryte konta serwisowe i funkcje debug

Jednym z najczęściej identyfikowanych problemów w systemach ICS/OT są fabryczne konta serwisowe lub funkcje diagnostyczne, które:

- Na nie są ujawnione w dokumentacji użytkownika.
- Posiadają stałe hasła lub mechanizmy autoryzacji trudne do zmiany.
- Umożliwiają pełny dostęp administracyjny do systemu. [insanecyber.com], [cybersecr...tynews.com]

W kontekście BMS/EMS takie konta mogą umożliwiać:

- Zmianę limitów napięć i temperatur.
- Modyfikację algorytmów ładowania i rozładowania.
- Dezaktywację zabezpieczeń sprzętowych.

8.8.2. Supply chain backdoor – przykład SolarWinds

Klasycznym przykładem backdoora łańcucha dostaw jest atak SolarWinds (2019–2020), w którym złośliwy kod został wprowadzony do oficjalnej aktualizacji oprogramowania. Choć dotyczył systemów IT, mechanizm ataku jest bezpośrednio przenoszalny na środowiska EMS i SCADA, które również korzystają z:

- Zdalnych aktualizacji firmware.
- Centralnych serwerów sterujących.
- Połączeń VPN. [processunity.com], [insanecyber.com]

Dla magazynów energii oznacza to realne ryzyko:

- Zdalnej modyfikacji logiki pracy EMS.
- Masowej ingerencji w wiele instalacji jednocześnie.
- Trudności w wykryciu ataku na wczesnym etapie.

8.9. Niezidentyfikowane kanały transmisyjne – zagrożenie ukryte w sprzęcie

8.9.1. Przykład z rynku OZE – nieudokumentowane moduły komunikacyjne

W 2024 i 2025 roku instytucje rządowe USA oraz niezależne laboratoria bezpieczeństwa ujawniły przypadki nieudokumentowanych urządzeń komunikacyjnych (m.in. modemów komórkowych) w falownikach i systemach bateryjnych przeznaczonych do pracy w sieci elektroenergetycznej. Urządzenia te:

- Nie występowały w dokumentacji technicznej.
- Nie były widoczne w konfiguracji sieciowej.
- Mogły działać niezależnie od głównego systemu sterowania. [cybersecur...tynews.com], [itecsonline.com]. [twit.tv]
- W 2025 r. amerykańscy eksperci oraz agencje rządowe wykryli nieudokumentowane moduły komunikacyjne w chińskich falownikach fotowoltaicznych i wielkoskalowych magazynach energii. Moduły te umożliwiały zestawienie połączenia zewnętrznego z pominięciem firewalli i segmentacji sieci OT. [zmescience.com], [cybersecur...tynews.com]
- Reuters oraz późniejsze analizy potwierdziły, że podobne urządzenia znaleziono także w systemach bateryjnych różnych producentów, co rozszerzyło ryzyko z samej PV na BESS. [economicti...atimes.com], [maya-security.com]

Mechanizm ten stanowi przykład out of band communication channel, czyli równoległego kanału transmisji, który:

- Omija zapory sieciowe.
- Nie jest monitorowany przez administratora.
- Może umożliwiać zdalny dostęp do infrastruktury krytycznej.

8.9.2. Znaczenie dla magazynów energii

W kontekście BESS potencjalny niezidentyfikowany kanał transmisyjny może:

- Umożliwiać zdalne wysyłanie poleceń do EMS lub przekształtników.
- Służyć do pasywnego zbierania danych operacyjnych.
- Pozwalać na czasowe wyłączanie lub destabilizowanie instalacji. [cisa.gov], [brattle.com]

Z punktu widzenia dyrektywy NIS 2 takie elementy:

- Stanowią naruszenie zasad kontroli łańcucha dostaw.
- Utrudniają ocenę ryzyka cybernetycznego.
- Mogą powodować odpowiedzialność zarządczą operatora system.

8.10. Inne udokumentowane incydenty ze świata energetyki

Do najczęściej cytowanych przykładów zagrożeń ICS należą:

- Atak na sieć elektroenergetyczną Ukrainy (2015) – zdalna manipulacja systemami sterowania, prowadząca do fizycznych przerw w dostawie energii.
- Działania grupy Volt Typhoon – długotrwałe, ukryte utrzymywanie dostępu do infrastruktury energetycznej USA w celu potencjalnych działań sabotażowych.
- Przejęcia sterowników PLC w systemach wodnych i energetycznych USA (2023–2024) poprzez publicznie dostępne interfejsy. [dni.gov], [cisa.gov]

Choć przypadki te nie dotyczyły bezpośrednio magazynów energii, pokazują, że ataki na warstwę OT mogą mieć realne, fizyczne konsekwencje, a nie wyłącznie charakter informatyczny.

8.11. Wnioski dla projektowania BMS i EMS

Uwzględniając powyższe przykłady, bezpieczny projekt systemów BMS i EMS powinien zakładać:

- Pełną transparentność sprzętową i programową.
- Możliwość audytu kodu i firmware.
- Fizyczną i logiczną separację kanałów Komunikacji.
- Brak „ukrytych” mechanizmów zdalnego dostępu.
- Zdolność bezpiecznego działania w trybie offline.

9. Bezpieczeństwo funkcjonalne pracy magazynu

Nowoczesne systemy BESS muszą zapewniać możliwość bezpiecznego odłączenia całych stringów DC pod pełnym obciążeniem, niezależnie od stanu przekształtnika czy systemu zarządzania. Takie rozwiązanie znacząco zwiększa bezpieczeństwo obsługi oraz ogranicza skutki potencjalnych awarii.

10. Podsumowanie

Wielkoskalowe magazyny energii w technologii LFP stanowią obecnie najbardziej dojrzałe i bezpieczne rozwiązanie dla sektora energetycznego. Kluczowe znaczenie ma prawidłowy dobór mocy i pojemności w odniesieniu do PPE, uwzględniający straty, degradację i bezpieczny zakres DoD. Uzupełnieniem aspektów technicznych są zagadnienia bezpieczeństwa termicznego, odpowiednia izolacja oraz spełnienie rygorystycznych wymogów cyberbezpieczeństwa wynikających z dyrektywy NIS 2. Tylko takie holistyczne podejście gwarantuje długoterminową niezawodność i opłacalność inwestycji.

Istotnym elementem zwiększającym poziom bezpieczeństwa jest stosowanie magazynów energii projektowanych i realizowanych przez polskiego producenta systemów BESS. Zapewnia on pełną kontrolę nad procesem doboru mocy i pojemności magazynu, integracją systemów BMS i EMS oraz realizacją inwestycji zgodnie z krajowymi i europejskimi wymaganiami technicznymi, sieciowymi oraz cyberbezpieczeństwa. Lokalna kompetencja projektowa i produkcyjna pozwala na minimalizację ryzyk technicznych i operacyjnych oraz dostosowanie magazynów energii do specyficznych warunków pracy polskiego systemu elektroenergetycznego. Poniżej karta informacyjna magazynów CORAB ENERGY STORAGE.



Corab Energy Storage

Corabes C-BOX



- Corabes C-Box to rodzina magazynów energii dedykowanych do instalacji komercyjnych i przemysłowych.
- Elektryczna pojemność: od 100 kWh do 1000 kWh.
- Modułowa konstrukcja.
- Zintegrowane obciążenie.

Corabes Power BOX



- Corabes Power Box to rodzina magazynów energii przeznaczonych do instalacji komercyjnych i przemysłowych.
- Elektryczna pojemność: od 100 kWh do 1000 kWh.
- Modułowa konstrukcja.
- Zintegrowane obciążenie.



Corabes Mega BOX



- Corabes Mega Box to rodzina magazynów energii przeznaczonych do instalacji komercyjnych i przemysłowych.
- Elektryczna pojemność: od 100 kWh do 1000 kWh.
- Modułowa konstrukcja.
- Zintegrowane obciążenie.



Informacje ogólne Corabes C-BOX
Moc instalacji (MW)
Maks. pojemność instalacji (MWh)

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

Informacje ogólne
Temperatura otoczenia (°C)
Wysokość instalacji (m)
Maksymalna głębokość instalacji (m)

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

Informacje ogólne Corabes Power BOX
Moc instalacji (MW)
Maks. pojemność instalacji (MWh)

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

Informacje ogólne
Temperatura otoczenia (°C)
Wysokość instalacji (m)
Maksymalna głębokość instalacji (m)

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

Informacje ogólne Corabes Mega BOX
Moc instalacji (MW)
Maks. pojemność instalacji (MWh)

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

5,000

0,500

Informacje ogólne
Temperatura otoczenia (°C)
Wysokość instalacji (m)
Maksymalna głębokość instalacji (m)

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

-20...50

2,00

2,00

Rys. 1. Karta informacyjna magazynów CORAB ENERGY STORAGE