

Kluczowe funkcje EMS w systemach magazynowania energii

Kluczowe funkcje EMS w systemach magazynowania energii

Michał Zając – SPIE Energotest

Streszczenie

Referat przedstawia rolę systemu zarządzania energią (EMS – Energy Management System) w systemach magazynowania energii (BESS – Battery Energy Storage Systems) w kontekście rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii w Polsce. W pracy omówiono architekturę systemów BESS, funkcje poszczególnych warstw sterowania (EMS, PPC, SCADA, BMS) oraz ich wzajemne zależności.

Szczególną uwagę poświęcono funkcjom EMS związanym z optymalizacją pracy magazynu energii, w tym strategiom arbitrażu cenowego, świadczeniu usług systemowych (FCR, aFRR, mFRR) oraz integracji z rynkiem energii. Wskazano, że zastosowane algorytmy sterowania i predykcji mogą istotnie wpływać na rentowność inwestycji, powodując różnice w przychodach sięgające nawet kilkudziesięciu procent dla tych samych zasobów technicznych.

W referacie omówiono również wyzwania związane z projektowaniem i eksploatacją systemów EMS, takie jak zmienność cen energii, wymagania dotyczące dostępności i cyberbezpieczeństwa, integracja z systemami operatorów oraz konieczność uwzględnienia degradacji baterii. Przedstawiono także aktualne modele biznesowe magazynów energii oraz kierunki dalszego rozwoju systemów EMS, w tym wykorzystanie zaawansowanej analityki danych i sztucznej inteligencji.

1. Wstęp

W Polsce inwestycje w magazyny energii BESS wynikają głównie z połączenia czynników technicznych, regulacyjnych i ekonomicznych. Polski system energetyczny ma coraz większy udział źródeł odnawialnych – fotowoltaiki i energetyki wiatrowej. Problem polega na tym, że produkcja energii z tych źródeł jest zmienna i trudna do przewidzenia. Rozwiązaniem są magazyny energii, które wyposażone w odpowiedni system EMS pomagają bilansować system, stabilizować częstotliwość, ograniczać wahania mocy. Są one jak bardzo szybka elektrownia regulacyjna.

Rosnąca liczba wyłączeń OZE w Polsce, gdy operator systemu musi ograniczać produkcję z OZE, bo sieć przesyłowa nie jest w stanie przyjąć całej energii, również wspiera idee inwestowania w magazyny energii. Pozwalają one przechować nadwyżkę energii aby oddać ją później do sieci (timeshifting). Pozwala to zoptymalizować wykorzystanie OZE i zabezpieczyć zyski (lub utrzymać założone koszty energii) inwestorów (przemysł).

Magazyny energii mogą świadczyć usługi dla operatora systemu przesyłowego PSE. Usługi systemowe (rynek mocy i rezerw):

Usługa	Cel
FCR	stabilizacja częstotliwości
aFRR	automatyczna regulacja mocy
mFRR	ręczna regulacja systemu

Tabela 1. Usługi systemowe MEE

Polska ma jeden z najszybszych wzrostów PV w Europie. Produkcja energii z PV jest największa w godzinach 11:00–15:00, natomiast zapotrzebowanie rośnie wieczorem. Magazyny energii umożliwiają „przesunięcie energii w czasie” zmniejszenie tzw. duck curve. Sieć elektroenergetyczna w Polsce jest ona przeciążona i ma ograniczoną przepustowość. Jej modernizacja nie nadąży za skalą rozwoju infrastruktury OZE. Magazyny energii pomagają zmniejszyć te przeciążenia oraz poprawić lokalną stabilność sieci, a także odroczyć kosztowne inwestycje w sieć.

W Polsce pojawiały się nowe modele biznesowe dla BESS. Źródła przychodów magazynów energii to arbitraż cenowy (kupno taniej energii, sprzedaż drożej), usługi systemowe (FCR, aFRR, mFRR), capacity market (wynagrodzenie za dostępność) oraz usługi dla OZE (stabilizacja produkcji i zabezpieczenie zysków). Aktualnie role wypełniają m.in. elektrownie zawodowe.

Polska i UE wspierają rozwój magazynów energii poprzez KPO (Krajowy Plan Odbudowy), Fundusz Modernizacyjny, aukcje rynku mocy, programy NFOŚiGW, dzięki czemu powstają projekty o mocy setek MW.

Polska odchodzi od energetyki węglowej. Magazyny energii pomagają integrować OZE, zwiększać elastyczność systemu, ograniczać emisję CO₂, przez co są ważnym elementem transformacji energetycznej.

2. Rola magazynów energii

W roku 2025 zaobserwowano większą zmienność cen energii, a nawet epizody ujemnych cen na rynku OZE. W związku z tym nastąpiła zmiana podejścia inwestorów ze „zbuduj i sprzedawaj” na „zbuduj, ale zabezpiecz przychód”, przez co coraz częściej sprzedaje się nie samą energię / instalację, tylko pakiet stabilizacji – magazyn + EMS/sterowanie + optymalizacja handlowa + usługi systemowe. Magazyny energii z etapu pilotażu wchodzi do mainstreamu inwestycyjnego, a żeby z nich optymalnie korzystać potrzebne są systemy EMS wykorzystujące funkcjonalność predykcji cen, algorytmami arbitrażu i autokonsumpcji. Elastyczność stała się produktem, a EMS jest silnikiem przychodu, ponieważ zmniejsza ekspozycję na ujemne ceny.

Podczas projektowania systemu EMS należy pamiętać o następujących kwestiach:

- wysoka dostępność systemu (>99,5% / rok)
- szybka reakcja na awarie krytyczne (SLA - 365/24/7)
- gwarancja wydajności i optymalizacji pracy baterii
- monitoring i raportowanie pracy
- bezpieczeństwo cybernetyczne (IEC 62443, ISO 27001)
- aktualizacje i utrzymanie oprogramowania
- integracja z BMS / PCS / SCADA / rynkiem energii
- skalowalność systemu

EMS musi współpracować z PCS, BMS, SCADA, systemami operatora sieci i platformami tradingowymi. Największym problemem w projektach BESS nie jest sprzęt, ale algorytm optymalizacji EMS. Dwa różne EMS mogą generować około 20–40% różnicy w przychodach z tego samego magazynu.

Odpowiedzialność poszczególnych elementów systemu zarządzania magazynem energii przedstawia się następująco:

a) EMS – Energy Management System - najwyższa warstwa logiki:

- optymalizacja pracy magazynu
- strategię rynkowe
- dispatch power
- prognozy cen energii
- zarządzanie SOC
- zarządzanie portfelem assetów

EMS decyduje ile mocy magazyn ma oddać lub pobrać i kiedy najlepiej to zrobić.

b) PPC – Power Plant Controller - warstwa kontroli elektrowni:

- realizacja poleceń EMS
- kontrola mocy aktywnej i biernej
- kontrola napięcia
- regulacja częstotliwości

PPC tłumaczy sygnały EMS na odpowiedni set point dla PCS.

c) SCADA - system monitoringu:

- wizualizacja
- alarmy
- zbieranie danych

- interfejs operatora
- raportowanie

d) PCS – Power Conversion System - falownik magazynu energii:

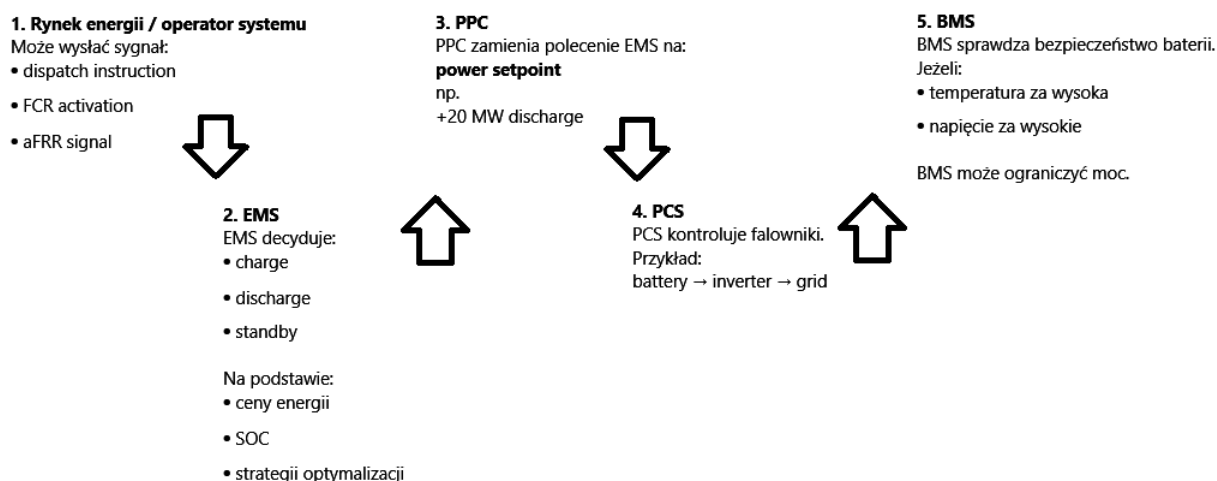
- konwersja DC ↔ AC
- kontrola mocy
- synchronizacja z siecią

e) BMS – Battery Management System - system bezpieczeństwa baterii.

- monitoring napięcia ogniwi
- temperatura
- balansowanie ogniwi
- zabezpieczenia

BMS może odłączyć baterię, jeżeli pojawi się ryzyko awarii.

Komunikację pomiędzy poszczególnymi komponentami BESS przedstawiono na poniższym rysunku:



Rys. 1. Komunikacja pomiędzy Operatorem/Rynkiem energii, EMS, PPC, PCS i BMS

3. Cyberbezpieczeństwo systemów BESS

Systemy magazynowania energii wraz z warstwą EMS stanowią element infrastruktury krytycznej, dlatego wymagania w zakresie cyberbezpieczeństwa są szczególnie istotne. Integracja z systemami operatorów sieci, platformami tradingowymi oraz zdalny dostęp serwisowy pozwalają na większe możliwości ataku.

Podstawą projektowania bezpiecznego systemu jest podejście warstwowe (defence-in-depth), obejmujące zarówno zabezpieczenia na poziomie sieci, systemów IT/OT, jak i samej aplikacji EMS.

W praktyce stosuje się następujące środki bezpieczeństwa:

- segmentacja sieci (wydzielenie stref OT, IT oraz DMZ),
- kontrola dostępu i uwierzytelnianie (role użytkowników, MFA),
- szyfrowanie komunikacji (VPN, TLS),
- monitorowanie i rejestrowanie zdarzeń (SIEM, logowanie),
- hardening urządzeń i systemów operacyjnych,
- zarządzanie aktualizacjami i podatnościami (patch management),
- kontrola dostępu zdalnego (jump host, dostęp warunkowy),
- kopie zapasowe i procedury odtworzeniowe (backup i disaster recovery).

Szczególne znaczenie ma zabezpieczenie komunikacji pomiędzy EMS, PPC, SCADA oraz systemami zewnętrznymi, ponieważ manipulacja sygnałami sterującymi może prowadzić do nieprawidłowej pracy magazynu lub destabilizacji systemu elektroenergetycznego.

W kontekście standardów branżowych najczęściej stosowane są:

IEC 62443 – bezpieczeństwo systemów przemysłowych,
ISO/IEC 27001 – zarządzanie bezpieczeństwem informacji,
dobre praktyki operatorów systemów elektroenergetycznych.

Wdrożenie odpowiednich mechanizmów cyberbezpieczeństwa jest nie tylko wymaganiem regulacyjnym, ale również warunkiem zapewnienia ciągłości działania systemu oraz spełnienia wymagań SLA.

4. Algorytmy optymalizacji

Kluczowym elementem systemu EMS jest warstwa decyzyjna, odpowiedzialna za optymalizację pracy magazynu energii w czasie rzeczywistym oraz w horyzoncie prognozowanym. Zadaniem EMS jest określenie optymalnego profilu ładowania i rozładowania magazynu przy uwzględnieniu ograniczeń technicznych oraz warunków rynkowych.

Proces optymalizacji opiera się na następujących danych wejściowych:

- prognozy cen energii,
- prognozy produkcji OZE,
- zapotrzebowanie na moc,
- stan naładowania baterii (SOC),
- ograniczenia techniczne systemu (moc, pojemność, rampy, starzenie się instalacji).

W praktyce stosowane są różne podejścia algorytmiczne, w tym:

- metody optymalizacji liniowej i mieszanej (MILP),
- algorytmy heurystyczne,
- modele predykcyjne oparte na uczeniu maszynowym.

Funkcja celu najczęściej obejmuje maksymalizację przychodu z arbitrażu cenowego oraz usług systemowych przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów degradacji baterii. EMS musi podejmować decyzje w warunkach niepewności, dlatego istotną rolę odgrywają prognozy oraz scenariusze probabilistyczne. Standardowo magazyn w ciągu dnia realizuje 1-2 cykle ładowania / rozładowania. Dodatkowym wyzwaniem jest tzw. „stacking usług”, czyli jednoczesne świadczenie wielu usług (np. arbitraż + FCR), co wymaga dynamicznego podziału dostępnej mocy magazynu pomiędzy różne rynki. Efektywność zastosowanego algorytmu ma bezpośredni wpływ na wyniki ekonomiczne instalacji, dlatego stanowi jeden z najważniejszych elementów całego systemu BESS. W praktyce największym wyzwaniem nie jest sam model optymalizacyjny, lecz jakość danych wejściowych oraz dokładność prognoz cen energii.

5. Degradacja baterii

Jednym z kluczowych aspektów eksploatacji magazynów energii jest degradacja baterii, która bezpośrednio wpływa na żywotność oraz ekonomikę projektu. Każdy cykl ładowania i rozładowania powoduje stopniowe zużycie ogniw, co prowadzi do spadku pojemności oraz mocy dostępnej magazynu.

System EMS musi uwzględniać degradację baterii w procesie optymalizacji, ponieważ maksymalizacja krótkoterminowych przychodów może prowadzić do szybszego zużycia zasobu i pogorszenia wyników w dłuższym horyzoncie czasowym.

Najważniejsze czynniki wpływające na degradację to:

- liczba i głębokość cykli (DoD – Depth of Discharge),

- temperatura pracy,
- praca w skrajnych zakresach SOC,
- wysokie prądy ładowania i rozładowania.

W nowoczesnych systemach EMS stosuje się modele degradacyjne, które pozwalają przypisać koszt zużycia baterii do każdej decyzji operacyjnej. Dzięki temu możliwe jest podejmowanie decyzji optymalnych nie tylko z punktu widzenia bieżących przychodów, ale również całkowitego cyklu życia instalacji.

Uwzględnienie degradacji baterii jest szczególnie istotne w kontekście intensywnych strategii arbitrażowych oraz świadczenia usług systemowych wymagających szybkich zmian mocy.

6. Studium przypadku

Rozważmy magazyn energii o mocy 50 MW i pojemności 100 MWh pracujący w systemie z dużym udziałem fotowoltaiki. W godzinach południowych (11:00–15:00) występują niskie lub ujemne ceny energii, natomiast w godzinach wieczornych (18:00–22:00) ceny znacząco rosną. System EMS może zastosować następującą strategię:

- ładowanie magazynu w godzinach niskich cen,
- utrzymywanie rezerwy mocy na potrzeby usług systemowych (np. FCR),
- rozładowanie magazynu w godzinach szczytu cenowego.

Dodatkowo EMS może dynamicznie przełączać się pomiędzy trybem arbitrażu a świadczeniem usług systemowych w zależności od aktualnych warunków rynkowych.

W analizowanym scenariuszu zastosowanie zaawansowanego EMS pozwala na zwiększenie przychodów poprzez optymalne wykorzystanie różnic cenowych oraz dostępnych usług systemowych, przy jednoczesnym ograniczeniu degradacji baterii.

7. Procedura black start

W przypadku poważnej awarii systemu elektroenergetycznego lub całkowitego zaniku zasilania, system EMS skonfigurowany w systemie BESS powinien posiadać funkcję black start. Po zakończeniu procedury black start system BESS powinien mieć możliwość przejścia z trybu wyspowego do trybu pracy synchronicznej z siecią elektroenergetyczną.

Krok pierwszy procedury black start to autodiagnostyka systemu EMS oraz wysłanie polecenia black start do systemu BMS. EMS sprawdza, czy BMS znajduje się w stanie zatrzymania. Jeśli bateria jest zatrzymana, EMS wysyła polecenie uruchomienia do BMS, aby zapewnić jego pracę. EMS musi zweryfikować, że stan naładowania (SOC) baterii przekracza minimalny próg np. 20%, aby mogła uczestniczyć w black start. Jeśli SOC jest niższy niż 20%, udział w black start będzie niedozwolony.

EMS automatycznie sprawdza, czy SOC każdej sekcji baterii przekracza 20%. Dla sekcji spełniających ten warunek EMS wydaje polecenie startu do BMS, a dla tych poniżej 20% – nie. Po uruchomieniu BMS wysyłane jest polecenie black start.

W drugim kroku wysłanie polecenia black start do systemu PCS. Jeśli EMS wykryje, że BMS wszedł w tryb black start i system baterii pracuje, wyśle polecenie black start do PCS. Weryfikacja powodzenia black start przez EMS. Sukces black start jest określany na podstawie z góry ustalonego czasu trwania tej procedury (określonego na etapie uruchomienia). Po upływie tego czasu od wysłania polecenia, poziom napięcia PCS może zostać wykorzystany do oceny, czy procedura zakończyła się powodzeniem. Po udanym black start, gdy operator EMS otrzyma informację o przywróceniu sieci, ręcznie wysyła polecenie synchronizacji i przyłączenia do sieci do PCS za pomocą interfejsu HMI EMS. Polecenie jest realizowane poprzez komunikację EMS–PCS.

Po otrzymaniu polecenia koordynator PCS reguluje moc wyjściową magazynu energii, aby zsynchronizować napięcie i częstotliwość z siecią. Regulacja trwa do momentu zamknięcia wyłącznika w

punkcie przyłączenia lub do osiągnięcia limitu czasu (niepowodzenie synchronizacji). W przypadku niepowodzenia synchronizacji, EMS musi ponownie wydać polecenie synchronizacji. Po przywróceniu normalnej pracy sieci EMS wysyła polecenie przejścia baterii do trybu normalnego, opuszczając tryb black start. Po ponownym przyłączeniu BESS do sieci, EMS wysyła polecenie do PCS zmiany trybu pracy z „grid forming” na „grid following”. Powyższy opis ma charakter orientacyjny.

8. Podsumowanie

Systemy magazynowania energii stają się kluczowym elementem transformacji energetycznej, umożliwiając integrację niestabilnych źródeł odnawialnych oraz zwiększenie elastyczności systemu elektroenergetycznego. Centralnym elementem determinującym efektywność ich działania jest system EMS, który odpowiada za optymalizację pracy magazynu oraz maksymalizację przychodów.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że różnice w jakości algorytmów sterowania EMS mogą prowadzić do znaczących różnic w wynikach ekonomicznych projektów BESS, sięgających nawet 20–40% przychodów. W związku z tym EMS przestaje być jedynie systemem sterowania, a staje się kluczowym komponentem biznesowym, decydującym o opłacalności inwestycji.

Wraz z rosnącą zmiennością cen energii oraz pojawieniem się nowych modeli rynkowych, takich jak usługi systemowe i agregacja zasobów, rola EMS będzie dalej rosła. Jednocześnie istotnym wyzwaniem pozostaje uwzględnienie degradacji baterii, zapewnienie wysokiej dostępności systemu oraz spełnienie rosnących wymagań w zakresie cyberbezpieczeństwa.

W przyszłości rozwój systemów EMS będzie zmierzał w kierunku wykorzystania zaawansowanych metod predykcyjnych, uczenia maszynowego oraz integracji w ramach wirtualnych elektrowni (VPP), co umożliwi jeszcze lepsze wykorzystanie elastyczności magazynów energii i ich udział w rynku energii. W praktyce inwestycyjnej EMS staje się elementem różnicującym projekty BESS, a nie jedynie komponentem technicznym.

Literatura

- [1] PSE S.A.: Warunki dotyczące świadczenia usług systemowych (FCR, aFRR, mFRR), materiały operatorskie, 2024
- [2] ENTSO-E: Balancing in Europe – Overview of Ancillary Services and Market Design, 2023
- [3] International Energy Agency (IEA): Energy Storage – Tracking Clean Energy Progress, 2024
- [4] BloombergNEF: Global Energy Storage Market Outlook, 2024
- [5] IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security, International Electrotechnical Commission
- [6] ISO/IEC 27001: Information security management systems – Requirements, International Organization for Standardization
- [7] European Commission: Energy Storage Strategy and Market Developments in the EU, 2023
- [8] NFOŚiGW: Programy wsparcia dla magazynów energii w Polsce, materiały informacyjne, 2024
- [9] URE: Rynek mocy w Polsce – zasady funkcjonowania i wyniki aukcji, 2024
- [10] Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J.: Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied Energy, 2015
- [11] Zakeri B., Syri S.: Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015
- [12] Michał Zajac - Materiały wewnętrzne SPIE Energotest, 2026