

Bilansowanie i utrzymanie w pracy wyspowej lokalnego systemu elektroenergetycznego obiektów krytycznych

Bilansowanie i utrzymanie w pracy wyspowej lokalnego systemu elektroenergetycznego obiektów krytycznych

Maciej Kowalski – EPConstruction
Mariusz Talaga – Spie Energotest

Streszczenie

W referacie przedstawiono zagadnienia związane z bilansowaniem mocy oraz utrzymaniem stabilnej pracy wyspowej lokalnych systemów elektroenergetycznych przeznaczonych do zasilania obiektów o znaczeniu krytycznym. Szczególną uwagę poświęcono mikrosieci elektroenergetycznej opartej na określonej infrastrukturze, zdolnej do pracy w trybie wyspowym typu Black Start. Omówiono strukturę systemu, źródła wytwórcze, charakterystyki odbiorów oraz kluczowe aspekty techniczne, takie jak bilans mocy czynnej i biernej, automatyka zabezpieczeniowa, stabilność częstotliwości i napięcia oraz wymagania normatywne. Wskazano również istotne wyzwania eksploatacyjne oraz kierunki rozwoju, w tym wykorzystanie magazynów energii i systemów inteligentnego sterowania. Przytoczono możliwości zastosowania urządzeń PMU do realizacji funkcji automatyki dla lokalnych systemów Elektroenergetycznych.

1. Wstęp

Współczesne systemy elektroenergetyczne funkcjonują w warunkach rosnącej niepewności, wynikającej z transformacji energetycznej oraz dynamicznie zmieniającej się sytuacji geopolitycznej. Szczególnie istotny jest wzrost zagrożeń hybrydowych i konfliktów kinetycznych w Europie Wschodniej, co wpływa na postrzeganie bezpieczeństwa energetycznego jako kluczowego filaru bezpieczeństwa państwa. Infrastruktura krytyczna, obejmująca szpitale, węzły telekomunikacyjne, centra zarządzania kryzysowego i strategiczne zakłady przemysłowe, musi spełniać rygorystyczne wymagania niezawodności zasilania. Oznacza to zdolność do długotrwałego funkcjonowania bez dostępu do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, ponieważ energia elektryczna jest podstawowym nośnikiem realizacji kluczowych funkcji tych obiektów. Nawet krótkotrwała przerwa w dostawie może prowadzić do poważnych konsekwencji, w tym zagrożenia życia lub destabilizacji procesów technologicznych.

Tradycyjne systemy zasilania rezerwowego, oparte na agregatach prądowórczych, ewoluują w kierunku inteligentnych mikrosieci. Te systemy integrują różne źródła energii, w tym jednostki kogeneracyjne, instalacje odnawialne i magazyny energii, umożliwiając autonomiczną pracę wyspową i lokalne bilansowanie mocy. W przeciwieństwie do klasycznych systemów, mikrosieci muszą samodzielnie utrzymywać stabilność częstotliwości i napięcia, co wymaga zaawansowanych algorytmów sterowania i szybkich układów regulacji. Kluczowe są również systemy zabezpieczeniowe wykrywające niepożądane stany, takie jak nieintencjonalna praca wyspowa.

Celem referatu jest analiza metod bilansowania i utrzymania stabilnej pracy lokalnych systemów elektroenergetycznych w trybie wyspowym, ze szczególnym uwzględnieniem infrastruktury krytycznej. Przedstawiono zarówno klasyczne podejścia do regulacji i zabezpieczeń, jak i nowoczesne rozwiązania oparte na synchronicznych pomiarach fazowych (synchrofazorach) oraz zaawansowanych systemach sterowania, zwiększających niezawodność i odporność mikrosieci na zakłócenia.

2. Mikrosieć: architektura, tryby pracy i wyzwania techniczne

2.1. Porównanie jednostek wytwórczych i możliwości sterowania

Mikrosieć elektroenergetyczna to zintegrowany system lokalnych źródeł wytwórczych i odbiorników, który posiada jasno zdefiniowane granice elektryczne i może działać jako jeden, kontrolowany podmiot względem sieci nadrzędnej. Efektywne bilansowanie takiej sieci w trybie wyspowym wymaga doboru źródeł o komplementarnych cechach dynamicznych. Architektura ta opiera się zazwyczaj na czterech komponentach: mikrogeneratorach (OZE i jednostki spalinowe), magazynach energii (BESS), sterowalnych odbiornikach oraz nadrzędnym systemie EMS. W obiektach krytycznych kluczowe jest połączenie źródeł maszynowych, posiadających naturalną inercję wirującą, ze źródłami inwerterowymi o bardzo wysokiej dynamice odpowiedzi. Silniki tłokowe gazowe dominują w układach kogeneracyjnych ze względu na wysoką sprawność elektryczną, jednak ich wrażliwość na skokowe zmiany obciążenia wymusza współpracę z magazynem energii, który pełni rolę "szybkiego stabilizatora".

Typ źródła	Zalety techniczne	Wady techniczne	Szybkość odpowiedzi
Silnik gazowy (tłokowy)	Wysoka sprawność elektryczna; wysoka dyspozycyjność.	Limit kroku mocy (30%); wysokie minimum techniczne.	Średnia (sekundy do minut).
Turbina gazowa	Duża elastyczność obciążenia; wysokie parametry pary.	Niższa sprawność elektryczna; wrażliwość na temperaturę.	Średnia (zależna od inercji cieplnej).
Magazyn energii (BESS)	Praca jako źródło referencyjne; syntetyczna inercja.	Limit pojemności; konieczność zarządzania SOC.	Bardzo wysoka (100–500 ms).
Fotowoltaika (PV)	Brak emisji; generacja w punkcie zużycia.	Brak stabilności; zerowa produkcja w nocy.	Natychmiastowa (elektroniczna).

Tabela 1. Zestawienie właściwości technicznych zasobów wytwórczych

2.2. Porównanie jednostek wytwórczych i możliwości sterowania

Lokalne systemy elektroenergetyczne mogą funkcjonować w dwóch podstawowych stanach operacyjnych: synchronicznym (on-grid) oraz autonomicznym (off-grid). W trybie synchronicznym mikrosieć pozostaje połączona z siecią operatora systemu dystrybucyjnego, pełniąc rolę układu odbiorczo-wytwórczego. W tym stanie nadrzędną rolę w bilansowaniu mocy pełni sieć zewnętrzna, natomiast lokalne źródła energii pracują w trybie optymalizacyjnym, dostosowując swoją generację do bieżącego zapotrzebowania oraz warunków ekonomicznych.

W warunkach braku zagrożeń systemowych istotną rolę odgrywa magazyn energii, który wykorzystywany jest nie tylko do celów bezpieczeństwa, ale również do poprawy efektywności ekonomicznej pracy układu. Realizowane jest to poprzez magazynowanie energii w okresach niskiego zapotrzebowania lub korzystnych warunków cenowych oraz jej oddawanie w okresach zwiększonego obciążenia, co pozwala na ograniczenie kosztów zakupu energii oraz zmniejszenie obciążenia sieci zewnętrznej. Jednocześnie magazyny energii utrzymywane są w odpowiednim stanie gotowości, umożliwiając natychmiastową reakcję w przypadku zakłóceń.

W trybie autonomicznym następuje galwaniczne odseparowanie mikrosieci od systemu nadrzędnego poprzez otwarcie łącznika sprzęgającego w rozdzielni średniego napięcia. W tym stanie cały układ musi samodzielnie zapewnić pokrycie zapotrzebowania odbiorów, przy jednoczesnym utrzymaniu wymaganych parametrów jakościowych energii elektrycznej, w szczególności częstotliwości i napięcia w dopuszczalnych granicach.

Kluczowym wymaganiem dla systemów zasilających infrastrukturę krytyczną jest realizacja bezprzerwowego przejścia pomiędzy trybami pracy (tzw. seamless transition). W praktyce oznacza to konieczność bardzo szybkiego przełączenia układu, niezauważalnego dla większości odbiorników. Osiągnięcie takiego efektu możliwe jest dzięki zastosowaniu magazynów energii pracujących w trybie grid-forming, które w momencie zaniku zasilania przejmują funkcję źródła napięcia odniesienia dla całej mikrosieci.

W pierwszej fazie przejścia system sterujący pracą mikrosieci (EMS/SZM) steruje pracą magazynu energii w taki sposób, aby zapewnić natychmiastowe zbilansowanie mocy w układzie. Magazyn energii kompensuje niedobór lub nadmiar mocy, stabilizując podstawowe parametry pracy systemu, w szczególności częstotliwość i napięcie. Następnie następuje stopniowe przejęcie obciążenia przez jednostki dyspozycyjne, takie jak układy kogeneracyjne lub agregaty prądotwórcze.

Prawidłowa realizacja tego procesu wymaga ścisłej koordynacji działania systemów sterowania, automatyki zabezpieczeniowej oraz układów regulacji, które muszą działać w sposób skoordynowany i w bardzo krótkich czasach reakcji.

W marginalnych przypadkach magazyn energii może pracować w konfiguracji zbliżonej do systemu UPS typu online, w której zasilanie odbiorów realizowane jest stale poprzez przekształtnik energoelektroniczny. Takie rozwiązanie umożliwia całkowicie bezprzerwowe przełączenie źródła zasilania, jednak wiąże się z ograniczeniem dostępnej mocy magazynu, wynikającym z charakteru pracy przekształtnikowej oraz konieczności utrzymania odpowiednich rezerw dynamicznych.

2.3. Bariery techniczne i problemy eksploatacyjne

Utrzymanie stabilnej pracy wyspowej w obiektach infrastruktury krytycznej napotyka na szereg barier technicznych wynikających z fizyki małych, wydzielonych systemów elektroenergetycznych. Najistotniejszym wyzwaniem jest problem niskiej inercji systemu; w przeciwieństwie do dużej sieci nadrzędnej, gdzie masa wirująca generatorów w elektrowniach zawodowych łagodzi zmiany częstotliwości, mikrosieci oparte na inwerterach (fotowoltaika, magazyny energii) reagują gwałtownymi zmianami częstotliwości df/dt na każde zaburzenie bilansu mocy czynnej. Równolegle występuje krytyczny problem braku selektywności zabezpieczeń wynikający z ograniczonych prądów zwarciovych; o ile generatory maszynowe dostarczają prądy zwarciove o wartości 5-10 In, o tyle układy energoelektroniczne ograniczają je do poziomu zaledwie 1,1-1,5 In w celu ochrony tranzystorów mocy, co często uniemożliwia poprawne zadziałanie klasycznej automatyki nadprądowej. Dodatkowe utrudnienie stanowią ograniczenia operacyjne jednostek spaliniowych, które wymagają minimalnego dociążenia na poziomie 25% mocy nominalnej – praca poniżej tego progu grozi zjawiskiem niedopalania paliwa (wet stacking) oraz awaryjnym odstawieniem. Problem ten potęguje głęboka sezonowość źródeł odnawialnych w polskiej strefie klimatycznej, gdzie znikoma produkcja z fotowoltaiki zimą wymusza posiadanie dużych rezerw paliwowych lub wdrażanie kosztownych technologii magazynowania długoterminowego.

3. Detekcja i bilansowanie pracy wyspowej

3.1. Klasyczne kryteria detekcji stanów awaryjnych

Skuteczna detekcja nieintencjonalnej pracy wyspowej (LOM – Loss of Mains) stanowi kluczowy element bezpieczeństwa operacyjnego mikrosieci. Zjawisku temu towarzyszą charakterystyczne zmiany parametrów elektrycznych, w szczególności częstotliwości, napięcia oraz kierunku przepływu mocy. W momencie utraty połączenia z siecią nadrzędną dochodzi do zaburzenia równowagi pomiędzy generacją a obciążeniem, co skutkuje odchyleniem częstotliwości oraz zmianami napięcia.

Podstawą detekcji są klasyczne kryteria progowe obejmujące:

- wzrost/spadek napięcia ($U >$, $U <$),
- wzrost/spadek częstotliwości ($f >$, $f <$),
- zmianę kierunku przepływu mocy czynnej i biernej,
- analizę szybkości zmian częstotliwości (ROCOF).

Dynamika zmian częstotliwości opisana jest zależnością:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n \cdot \Delta P}{2H}$$

W przypadku bliskiego zbilansowania mocy ($\Delta P \approx 0$) zmiany częstotliwości są niewielkie, co prowadzi do powstania martwej strefy detekcji (NZD). W praktyce szczególnie niebezpieczna jest sytuacja, w której lokalna generacja kogeneracyjna pokrywa zapotrzebowanie obiektu, umożliwiając długotrwałą pracę wyspą bez jej detekcji. Może to prowadzić do rozsynchronizowania układu oraz niebezpiecznych stanów przejściowych podczas ponownego załączenia do sieci elektroenergetycznej, jeśli nie zostanie użyta funkcja kontroli synchronizmu.

3.2. Technologia synchrofazorów (PMU) w diagnostyce rozproszonej

Ograniczenia klasycznych metod detekcji pracy wyspowej eliminowane są poprzez zastosowanie synchronicznych pomiarów fazowych z wykorzystaniem urządzeń typu PMU (*Phasor Measurement Unit*), takich jak rejestratory klasy RZ-50. Urządzenia te łączą funkcje rejestratora zdarzeń i zakłóceń z precyzyjnym pomiarem synchrofazorów napięć i prądów, zapewniając wysoką dokładność oraz spójność czasową danych w skali całego systemu.

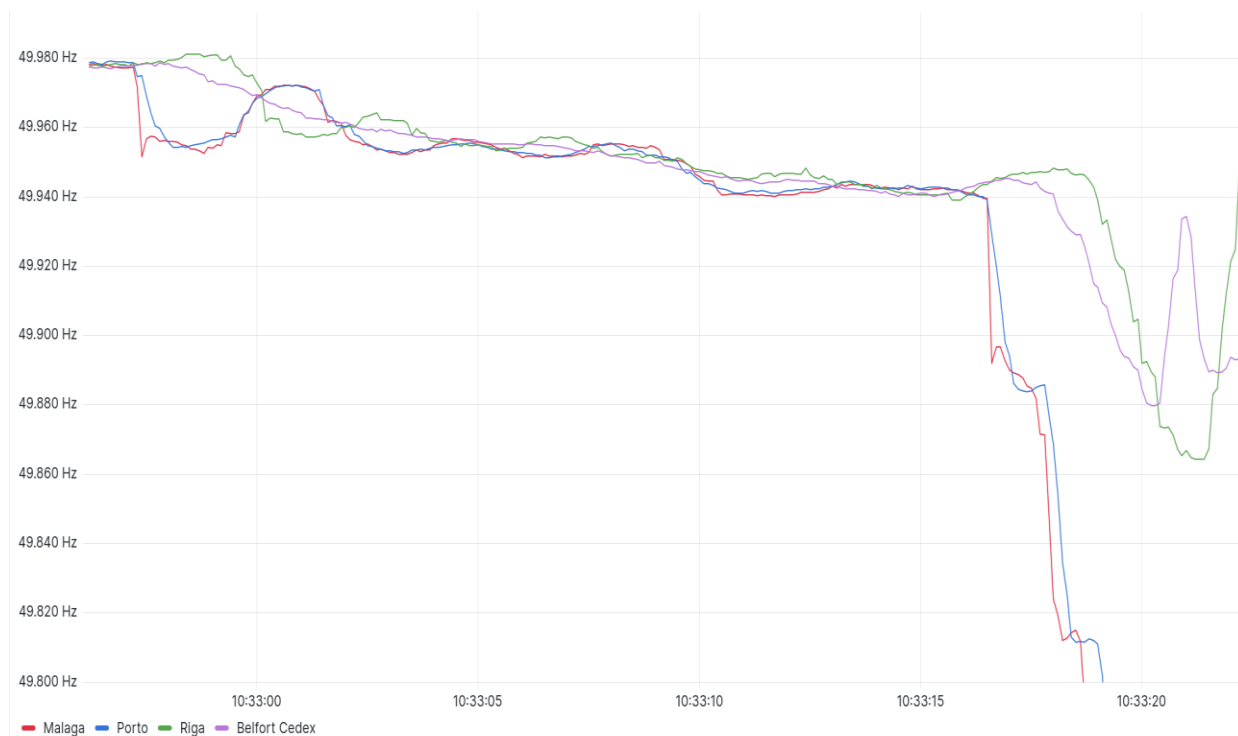
Aby zapewnić interoperacyjność tego rodzaju urządzeń różnych producentów istotnym jest, aby urządzenia te spełniały rygorystyczne wymagania opisane w normie IEC/IEEE 60255-118-1:2018. [14]. Szczególnie wymagane jest to w stanach dynamicznych (nieustalonych). Potwierdzeniem spełniania tych wymagań jest certyfikat wystawiony przez Instytut Energetyki oddz. w Gdańsku [17]. Niespełnienie tego warunku może skutkować problemami z działaniem EAZ opartymi o pomiary z jednostek PMU w sytuacjach awaryjnych z dynamicznymi zmianami wielkości pomiarowych, a więc w sytuacjach, gdy zależy na selektywnym działaniu automatyki.

Parametr	Wartość typowa / Zakres
Częstotliwość próbkowania	do 4 kHz (80 próbek na cykl)
Raportowanie synchrofazorów	50 ramek/s [14]
Dokładność synchronizacji czasu	$\leq 1\mu s$ (czas UTC z GPS/Galileo)
Czas odpowiedzi systemu	$\leq 40ms$ (klasa P / $F_s=50$) [14]
Interfejsy komunikacyjne	2x Ethernet, RS485, Optyczne
Protokoły komunikacyjne	IEC 61850 (MMS, GOOSE), Modbus TCP/RTU

Tabela 2. Wybrane parametry techniczne urządzenia RZ50/PMU [16]

System detekcji pracy wyspowej oparty jest na koncepcji monitoringu obszarowego (WAMS). W typowej konfiguracji jedna jednostka PMU instalowana jest w punkcie przyłączenia mikro sieci, natomiast druga w punkcie referencyjnym, zlokalizowanym w stabilnym węźle sieci elektroenergetycznej, oddalonym o kilkaset kilometrów. Dane synchrofazorowe przesyłane są za pomocą łączy światłowodowych do systemu nadrzędnego (PDC), gdzie następuje ich synchronizacja i analiza. Kluczowym parametrem diagnostycznym jest różnica kątów fazowych napięcia pomiędzy punktem lokalnym a referencyjnym. W warunkach pracy synchronicznej różnica ta pozostaje stabilna, natomiast w przypadku odłączenia mikro sieci obserwowany jest jej narastający dryf. Dzięki pomiarom realizowanym zarówno po stronie źródeł wytwórczych, jak i odbiorów, możliwe jest wykrycie pracy wyspowej w czasie bliskim rzeczywistości, niezależnie od poziomu zbilansowania mocy czynnej, co eliminuje ograniczenia klasycznych metod detekcji.

Na rys. 1 . przedstawiono przebiegi częstotliwości podczas wydzielenia półwyspu Iberyjskiego. Z analizy przebiegów wynika, że różnica kątów fazowych przekroczyła znacząco 90° przy spadku częstotliwości na wydzielonym obszarze do 49,8Hz. Świadczy to o niesynchronicznej pracy systemów i detekcji tego faktu znacznie szybciej niż tradycyjnymi metodami wykorzystującymi pomiary lokalne.



Rysunek 1. Częstotliwość zarejestrowane przez PMU w Europie (Blackout Hiszpania 28.04.2025). [15]

3.3. Procedura sterowania i bilansowania magazynem energii

Po wykryciu pracy wyspowej przez system PMU, sterownik mikrosieci inicjuje procedurę dynamicznego bilansowania, której celem jest utrzymanie stabilności parametrów pracy oraz zapewnienie ciągłości zasilania odbiorów krytycznych. Całość procesu oparta jest na deterministycznej komunikacji światłowodowej z wykorzystaniem standardu IEC 61850, gdzie komunikaty typu GOOSE umożliwiają realizację funkcji sterowania w czasie rzeczywistym.

W momencie odłączenia mikrosieci od systemu nadrzędnego dochodzi do nagłego zaburzenia równowagi pomiędzy generacją a obciążeniem. System sterowania, wykorzystując dane synchrofazorowe z jednostek pomiarowych rozmieszczonych w punktach generacji oraz odbiorów, dokonuje estymacji stanu układu oraz określa kierunek i wartość niedopasowania mocy czynnej i biernej.

W pierwszej fazie magazyn energii przejmuje funkcję źródła nadrzędnego (grid-forming), stabilizując napięcie oraz częstotliwość poprzez natychmiastową kompensację niedoboru lub nadmiaru mocy. Sterowanie realizowane jest z wykorzystaniem charakterystyk droop oraz mechanizmów syntetycznej inercji, które umożliwiają tłumienie dynamicznych zmian obciążenia oraz fluktuacji generacji ze źródeł odnawialnych.

Po ustabilizowaniu parametrów pracy system inicjuje proces stopniowego przejmowania obciążenia przez jednostki dyspozycyjne, takie jak silniki gazowe lub agregaty prądotwórcze. Proces ten realizowany jest w sposób płynny, z wykorzystaniem komunikacji przemysłowej, co pozwala na optymalizację punktu pracy źródeł oraz odciążenie magazynu energii.

Integracja systemu pomiarowego PMU z układem sterowania umożliwia prowadzenie regulacji w oparciu o dane wektorowe w czasie rzeczywistym, co znacząco zwiększa odporność mikrosieci na zakłócenia oraz pozwala na jej stabilną pracę w trybie wyspowym.

4. Zarządzanie rezerwą energetyczną (SOC)

Zapewnienie wysokiego poziomu niezawodności zasilania w mikrosieciach dedykowanych obiektom infrastruktury krytycznej wymaga świadomego zarządzania zasobami energii zgromadzonej w magazynach energii. Kluczowym parametrem eksploatacyjnym jest stan naładowania magazynu (SOC), który determinuje zdolność systemu do reagowania na zakłócenia oraz utrzymania pracy w trybie wyspowym.

W warunkach pracy synchronicznej z siecią elektroenergetyczną magazyn energii może być wykorzystywany do poprawy ekonomiki pracy systemu, w tym do wyrównywania profilu obciążenia, ograniczania mocy szczytowej oraz realizacji arbitrażu energetycznego. Jednak w przypadku infrastruktury krytycznej nadrzędnym celem jest utrzymanie odpowiedniej rezerwy energetycznej, umożliwiającej natychmiastową reakcję na zakłócenia.

W praktyce oznacza to wydzielenie części pojemności magazynu jako rezerwy operacyjnej, która nie podlega wykorzystaniu w bieżących cyklach optymalizacyjnych. Rezerwa ta zapewnia możliwość stabilizacji parametrów pracy mikrosieci w fazie przejścia do trybu wyspowego, a także umożliwia realizację procedury black start.

System zarządzania energią prowadzi ciągły nadzór nad poziomem SOC, uwzględniając aktualne warunki pracy, prognozy zapotrzebowania oraz dostępność źródeł wytwórczych. W sytuacjach podwyższonego ryzyka system może ograniczać wykorzystanie magazynu do celów ekonomicznych, zwiększając poziom zgromadzonej energii.

Istotnym elementem strategii zarządzania jest również współpraca magazynu energii z jednostkami wytwórczymi. W warunkach niskiego zapotrzebowania magazyn może być wykorzystywany do dociążania jednostek spaliniowych, umożliwiając ich pracę w optymalnym zakresie sprawności. Z kolei w warunkach wysokiego obciążenia pełni funkcję źródła wspomagającego, poprawiając stabilność systemu i ograniczając przeciążenia.

Odpowiednie zarządzanie stanem naładowania magazynu energii stanowi jeden z kluczowych elementów zapewnienia odporności mikrosieci na zakłócenia oraz jej zdolności do autonomicznego funkcjonowania.

5. Rola magazynu energii w poprawie warunków pracy automatyki zabezpieczeniowej

Po wydzieleniu obszaru do pracy autonomicznej, poza procesem bilansowania systemu, należy zapewnić warunki umożliwiające selektywne działanie Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej (EAZ). Jak wspomniano wcześniej, wyzwaniem jest brak wsparcia ze strony systemu elektroenergetycznego (SEE), który standardowo zapewnia wysoką moc zwarciovą oraz inercję. Z jednej strony utrudnia to selektywne działanie zabezpieczeń nadprądowych, z drugiej zaś – sieć pozbawiona inercji staje się wrażliwa na zmiany obciążenia, co prowadzi do dynamicznych wahań częstotliwości.

Przy skrajnie niskich wartościach inercji częstotliwość przestaje być wiarygodnym miernikiem niezbilansowania systemu. Takiej sytuacji należy się spodziewać po wydzieleniu źródeł opartych na technologii IBR (Inverter-Based Resources).

Stawia to przed EAZ wysokie wymagania. Bez wsparcia ze strony magazynu energii (ME) – zapewniającego sztuczną inercję oraz funkcje przejścia przez zwarcia FRT (Fault Ride Through) i LVRT (Low Voltage Ride Through) – selektywne działanie zabezpieczeń może okazać się niemożliwe. Dlatego rekomenduje się, aby ME spełniał wymagania Grid-Forming (GFM). Podstawowe wymagania dotyczące technologii GFM są obecnie wprowadzane do europejskich przepisów w ramach aktualizacji kodeksów sieciowych (tzw. NC RfG 2.0). [6]

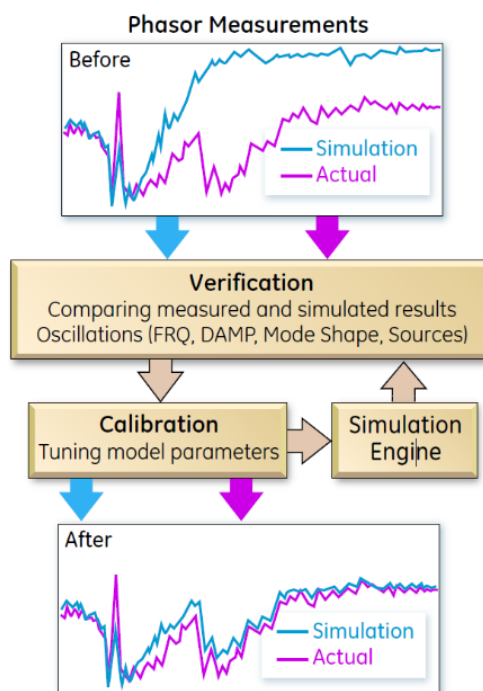
Mimo zastosowania powyższych środków, niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy selektywności zabezpieczeń zwarciovych. Prawdopodobnie po wykryciu pracy wyspowej konieczne będzie przełączenie terminali zabezpieczeniowych na alternatywną grupę nastaw. Jeśli działania te okażą się niewystarczające, rozważanym rozwiązaniem będzie zastosowanie zabezpieczeń różnicowych lub zaakceptowanie braku pełnej selektywności EAZ. Analiza działania EAZ może być przeprowadzona symulacyjnie, o ile dysponujemy odpowiednimi modelami elementów systemu.

6. Model systemu z udziałem OZE i jego walidacja

Do analizy zachowania systemu coraz częściej wykorzystywane są symulacje komputerowe odzwierciedlające pracę systemu tzw. „cyfrowy bliźniak”. Dzięki modelowaniu i symulacjom zdarzeń można przeanalizować działanie EAZ, oraz bezpieczeństwo i stabilność systemu. Wykorzystanie modeli w symulacjach ułatwia dobór funkcji i weryfikację ustawień automatyki EAZ. Wymagania dotyczące modeli matematycznych w Polsce są zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) oraz w dokumentach wynikających z kodeksu NC RfG. Grid-Forming: W nowych wytycznych (np. Karta aktualizacji 2/2024) pojawiają się wymagania dotyczące dostarczania modeli odwzorowujących funkcje Grid-Forming oraz Synthetic Inertia. Zgodnie z wymaganiami compliance, model musi odwzorowywać:

- Układy regulacji: (regulatory napięcia, mocy biernej, częstotliwości).
- Logikę sterowania inwerterów: (w tym funkcje GFM, jeśli są wymagane).
- Zabezpieczenia wewnętrzne: (np. progi podnapięciowe/nadnapięciowe).
- Odpowiedź dynamiczną: model musi przejść testy "skokowe" (zmiana zadanego napięcia/mocy) identyczne jak podczas testów na obiekcie.

Wymaga się walidacji modeli w warunkach rzeczywistych. Wykorzystanie PMU z funkcją rejestracji permanentnej (rejestracja ciągła parametrów systemu co 20ms) dostarcza danych pozwalających na walidację modelu z odpowiednią dokładnością. W [11] przytoczono przykłady wykorzystania pomiarów wysokiej rozdzielczości PMU do analizy odpowiedzi farm wiatrowych na różnego rodzaju zwarcia w SEE.

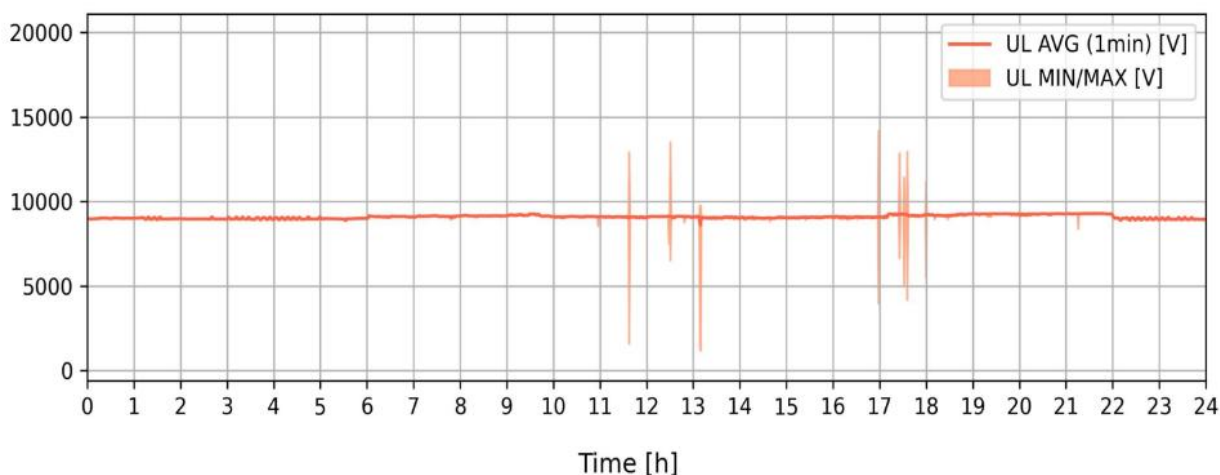


Rysunek 2. Ogólny proces walidacji i kalibracji modeli z wykorzystaniem synchrofazorów wg. [10].

7. Dane pomiarowe PMU - doświadczenia

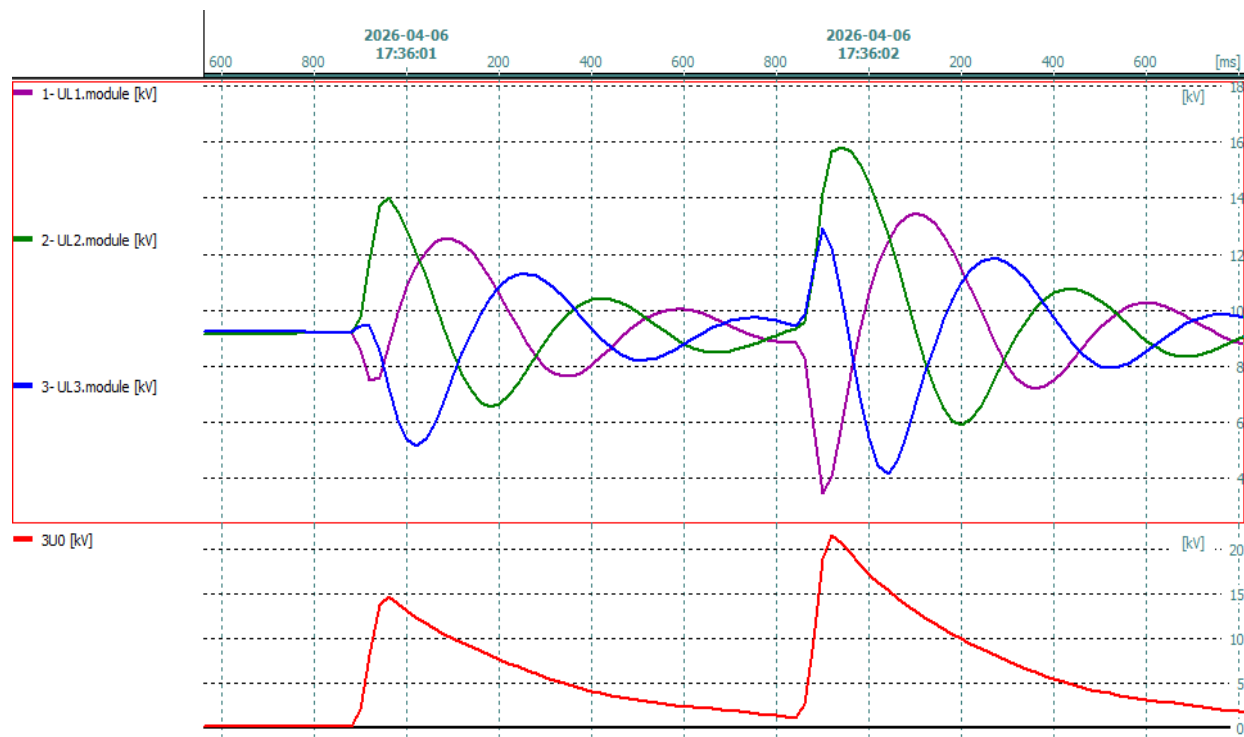
W SPIE Energotest od wielu lat [13] wykorzystuje się dane pomiarowe PMU wysokiej rozdzielczości do analizy zjawisk w SEE. W 2026 roku dodano funkcję permanentnej rejestracji bezpośrednio w urządzeniu PMU. Dane są rejestrowane z dokładnością rzędu 0,5% i rozdzielczością czasową 20ms w horyzoncie czasu rzędu tygodni w plikach jednogodzinnych. Poniżej przedstawiono fragment raportu jednodniowego dotyczącego pracy farmy PV o mocy 10MW [12]. Na podstawie zarejestrowanych danych dokonywana jest ocena działania EAZ oraz praca regulatorów podczas różnego rodzaju zjawisk sieciowych. Dane te mogą również posłużyć do walidacji modelu farmy PV.

Na rys. 3 zaprezentowano fragment raportu jednodniowego przedstawiający przebiegu napięcia jednej z faz. Raport jest tak sporządzony, aby widoczne były wartości maksymalne i minimalne analizowanej wielkości, oraz wartości uśrednione jednodniowe. Na poniższym przykładzie można rozpoznać zakłócenia wywołane zwarciami doziemnymi.



Rysunek 3. Raport jednodniowy, przebieg napięcia jednej fazy [12].

Na podstawie przebiegów jednodniowych w prosty sposób można wybrać plik jednogodzinny do szczegółowej analizy. Na rys. 4. Przykładowo przedstawiono przebiegi wartości skutecznych pierwszej harmonicznej napięć fazowych oraz 3U₀ z godziny 17:36.



Rysunek 4. Powiększony fragment z rys. 3. [12].

Podsumowanie

Utrzymanie stabilnej pracy wyspowej lokalnego systemu elektroenergetycznego infrastruktury krytycznej wymaga integracji zaawansowanych systemów automatyki oraz hybrydowej architektury źródeł. Kluczowe znaczenie ma współpraca magazynów energii z jednostkami trigeneracyjnymi i odnawialnymi źródłami energii, gdzie magazyn odpowiada za stabilność dynamiczną, a źródła paliwowe zapewniają długoterminową autonomię pracy systemu.

Istotnym elementem zwiększającym bezpieczeństwo operacyjne jest zastosowanie technologii synchrofazorów, która pozwala na jednoznaczną detekcję pracy wyspowej poprzez analizę dryfu kąta fazowego, eliminując ograniczenia klasycznych metod częstotliwościowych. Skuteczne bilansowanie mikrosieci wymaga również hierarchicznej struktury sterowania, w której magazyn energii pełni rolę źródła nadrzędnego, stabilizując parametry pracy oraz kompensując dynamiczne zmiany obciążenia.

Niezbędnym warunkiem poprawnej pracy systemu jest deterministyczna komunikacja czasu rzeczywistego, umożliwiająca szybką koordynację źródeł oraz realizację funkcji zabezpieczeniowych. Jednocześnie kluczowe znaczenie ma utrzymywanie odpowiedniej rezerwy energetycznej w magazynie energii, która zapewnia zdolność do stabilizacji systemu w stanach przejściowych oraz realizacji procedur odtworzeniowych.

Zastosowanie opisanych rozwiązań pozwala na budowę odpornych i autonomicznych systemów elektroenergetycznych zdolnych do niezawodnego zasilania infrastruktury krytycznej w warunkach zakłóceń.

Literatura

- [1] Kaźmierczak M., Zabezpieczenie od nieintencjonalnej pracy wyspowej – pomiar synchrofazora, 2020.
- [2] Lis R., Problemy z oceną stabilności napięciowej systemu elektroenergetycznego, 2010.
- [3] Juszczak A., Wawrzyniak R., WAMS/WAMC oparte na rozproszonych pomiarach synchrofazorów, 2024
- [4] Talaga M., Identyfikacja pracy wydzielonej układów elektroenergetycznych na podstawie różnicy kątów, 2023.
- [5] Mikrosieci energetyczne i rola OZE w decentralizacji energetyki, 2025
- [6] Entsoe. Grid Forming capability of power park modules. Report on technical requirements.2025.
- [7] PSE. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej.
- [8] Kodeks sieci (NC) dotyczący wymogów w zakresie przyłączania jednostek wytwórczych do sieci (RfG)
- [9] PSE. Wdrożenie wymogów wynikających z zapisów Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.
- [10] NASPI. Advanced Model Validation and Calibration using Synchrophasors. 2024.
- [11] Janardhan, Kumar, Rajendra. Unbalance faults usin PMU data and model validation. PAC world. March 2026.
- [12] SPIE Energotest. Materiały własne 2026.
- [13] A. Halinka, M. Talaga. Wykorzystanie pomiarów synchronicznych do realizacji obszarowej automatyki odciażania. Przegląd Elektrotechniczny. 2019.
- [14] Norma. IEC/IEEE 60255-118-1:2018. Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.
- [15] On-line. <https://gridradar.net/en/blog/post/blackout-iberian-peninsula>.
- [16] SPIE Energotest. Rejestrator RZ50/PMU. Instrukcja Użytkownika. Ver. 1.4. (2024).
- [17] Instytut Energetyki oddz. w Gdańsku. Certyfikat potwierdzający zgodność z IEC/IEEE Standard 60255-118-1:2018 dla RZ50/PMU. 2025.