mgr inż. Mariusz Talaga;
SPIE-Energotest,
prof. dr hab. inż. Adrian Halinka;
Politechnika Śląska

IDENTYFIKACA I ANALIZA STANÓW DYNAMICZNYCH W PUNKCIE PRZYŁĄCZENIA ŹRÓDŁA OZE

Streszczenie

W artykule poruszono zagadnienie identyfikacji stanów dynamicznych sygnałów pomiarowych pozyskiwanych w punkcie przyłączenia farmy PV do sieci dystrybucyjnej SN. Pozyskanie bazy przebiegów czasowych (z rozdzielczością na poziomie 20 ms) parametrów mierzonych wielkości odbyło się poprzez ciągłe monitorowanie punktu przyłączenia farmy PV do sieci z wykorzystaniem jednostki PMU (realizującej pomiary synchroniczne) zdolnej do rejestracji permanentnej. Taka forma i rozdzielczość rejestracji umożliwiają analizę stanów dynamicznych cech sygnałów pomiarowych pozwalających na ocenę zachowania się sieci o znacznym nasyceniu źródłami PV czy wiatrowymi. W dalszej części referatu zaprezentowano i oceniono pod kątem dynamiki zmian wybrane rejestracje dokonane w punkcie przyłączeniowym źródła PV w rzeczywistej strukturze sieciowej dystrybucyjnej. W podsumowaniu zaprezentowano potencjalne korzyści rejestracji stanów dynamicznych dla potrzeb modyfikacji lub tworzenia nowych algorytmów decyzyjnych automatyki zabezpieczeniowej czy wykorzystania przy wprowadzaniu technologii grid formingu

1. Wprowadzenie

Zauważalny obecnie wzrost obecności w systemie elektroenergetycznym (SEE) odnawialnych źródeł energii (OZE) ma istotny wpływ na stabilność SEE oraz zachowanie quasi stacjonarnych warunków pracy normalnej, co wymusza zmianę podejścia do analizy pracy SEE. Autorzy naświetlili problem np. w publikacji „Czy użycie sformułowania >*niestabilne źródła OZE*< jest właściwe" [1], wskazując na problemy z identyfikacją parametrów modeli tego typu źródeł.

W wielu publikacjach zwraca się uwagę na problem zachowania stabilności pracy SEE i związanych z tym wyzwań, szczególnie w kontekście obecności sterowalnych źródeł o szybkiej odpowiedzi na sygnały kontrolne (źródła PV czy wiatrowe z inwerterami energoelektronicznymi). Wyzwania te wiążą się z faktem stosunkowo szybkiej transformacji SEE od modelu z tradycyjnymi maszynami synchronicznymi do modelu z coraz większym poziomem instalowanych OZE. Pociąga to za sobą zmiany postrzegania pojęcia stabilności SEE od stosunkowo dobrze rozpoznanego [2], do systemu o coraz niższej inercji odpowiedzi na nagłe zdarzenia i wymuszaniu ograniczania poziomów prądów zwarciowych [3,4,5].

Zaproponowane rozwiązanie identyfikacji, m.in. stanów szybkozmiennych w pracy SEE polega na zastosowaniu jednostek PMU (Phasor Measurement Unit) z funkcją ciągłego lokalnego zapisu danych. Dane te, jak pokazano w dalszej części, mogą również służyć m.in. do weryfikacji nastaw kryteriów zabezpieczeniowych oraz modyfikacji funkcjonalności struktury automatyki zabezpieczeniowej, co staje się istotnym wyzwaniem przy coraz większym poziomie obecności w SEE jednostek OZE [6,7].

W artykule zaprezentowano wybrane przypadki (rejestracje) dokonane w miejscu przyłączenia farmy fotowoltaicznej (PV) o mocy kilku MW. Rejestracje parametrów fazorów sygnałów pomiarowych były prowadzone, m.in. pod kątem identyfikacji zjawisk szybkozmiennych związanych ze współpracą źródeł PV z SEE w związku z częstym uszkadzaniem transformatorów wyprowadzających moc z PV [8]. Potrzebę prac badawczych w wielu aspektach z wykorzystaniem PMU jako źródła wiarygodnych danych pomiarowych dla realizacji wielu celów szczególnie dla OSD szeroko omówiono w raporcie [9].

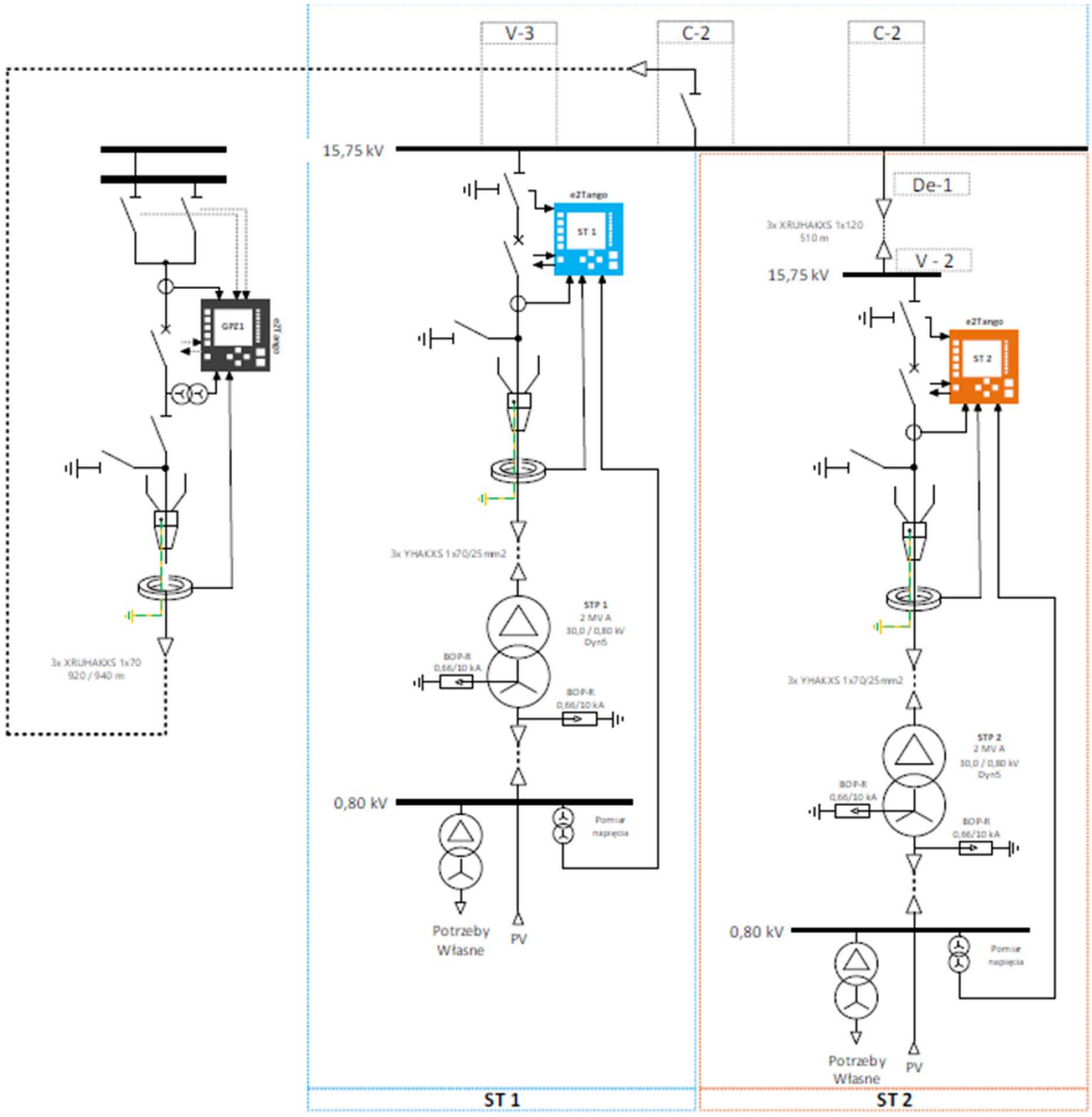
W poniższej publikacji zaprezentowano rozwiązanie z wykorzystaniem PMU, które pozwala na identyfikację i analizę stanów dynamicznych, a w konsekwencji, m.in.: walidację lub opracowanie modeli źródeł energii, wykorzystanie w wdrażaniu technologii grid forming czy modyfikacji automatyki zabezpieczeniowej. Szczególnie dotyczy to OZE, dla których modele zależą nie tylko od

parametrów technicznych zastosowanych urządzeń, ale przede wszystkim od algorytmu sterowania zaworami energoelektronicznymi inwerterów. Należy się spodziewać, że w wielu zastosowaniach modele OZE mogą być niedostępne, wtedy przedstawione rozwiązanie pomoże dokonać identyfikacji i opracowania struktury modelu oraz jego parametrów.

Zastosowanie rejestracji permanentnej z późniejszą analizą pozwala również na wypełnienie wymogów kodeksów sieciowych [11, 12] dla źródeł wytwórczych i parków energii typu C i D w zakresie rejestracji, weryfikacji modeli oraz detekcji oscylacji.

2. Cechy wykorzystanego układu rejestracji

Na potrzeby pilotażowego monitorowania transformatorów sieciowych farmy PV zainstalowano układ rejestracji oparty o jednostki PMU [8]. Typowy schemat wyprowadzenia mocy z farmy PV przedstawiono na rys. 1. Urządzenia rejestrujące zainstalowano tymczasowo, włączając je w obwody przekładników napięciowych i prądowych.



Rys. 1.Typowy układ podłączenia farmy PV do SEE [8].

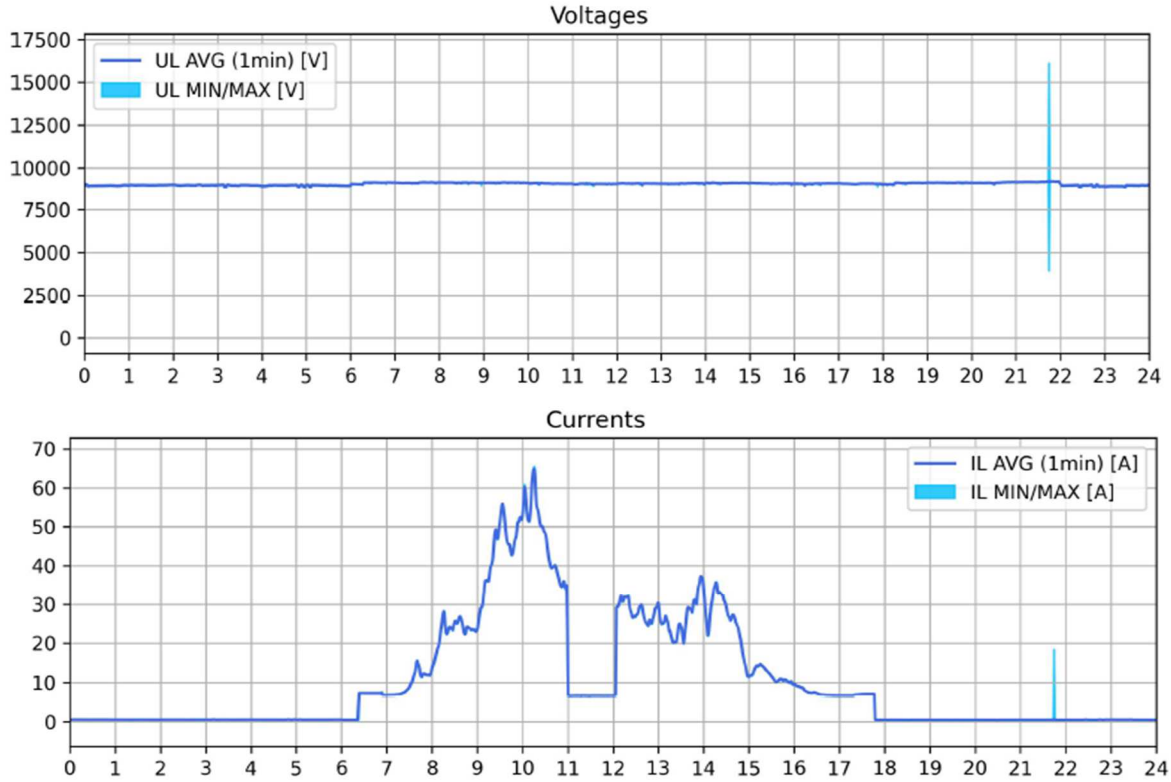
Zastosowane urządzenia PMU [13] charakteryzują się wysoką jakością rejestrowanych sygnałów zgodnie z wymaganiami norm [14], co zostało potwierdzone certyfikatem uzyskanym w Instytucie Energetyki oddz. Gdańsk. Poniżej przedstawiono wybrane cechy metrologiczne zastosowanych urządzeń przy wybranej konfiguracji:

- częstość raportowania: 50 pomiarów/s;
- klasa PMU: M (pomiarowa)
- sygnały pomiarowe: fazory napięć i prądów, częstotliwość, RoCoF, moce czynna i bierna
- błędy pomiarowe ±0,5%; ±0,001Hz; ±0,1°
- w zakresie 10…120% napięcia znamionowego
  10…3000% prądu znamionowego
  45…55Hz

Urządzenia te posiadają funkcję rejestracji permanentnej. Dzięki takiemu podejściu rejestrowane są wszystkie istotne sygnały elektryczne z rozdzielczością czasową 20ms w horyzoncie jednego miesiąca w plikach jednogodzinnych w standardzie COMTRADE. Raporty dzienne pozwalają na zapoznanie się z charakterem obciążenia transformatora pod kątem oceny zachowania spodziewanych warunków eksploatacyjnych. Dzięki rozdzielczości czasowej wynoszącej 20ms można również ocenić odpowiedź farmy PV na różnego rodzaju zdarzenia sieciowe jak i na sygnały regulacyjne.

3. Rejestracja danych

Do pliku rejestracji w formacie COMTRADE zapisywane są wartości parametrów (wartość skuteczna i kąt fazowy) sygnałów napięć i prądów fazowych, częstotliwość i jej pochodna oraz moc czynna i bierna. Na rys. 2 zaprezentowano fragment raportu jednodniowego przedstawiający przebieg napięcia i prądu jednej z faz. Raport jest tak sporządzony, aby widoczne były wartości maksymalne i minimalne analizowanej wielkości, oraz wartości uśrednione jednominutowe. Na poniższym przykładzie można rozpoznać zakłócenia wywołane zwarciami doziemnymi, które miały miejsce po godz. 21:00, co będzie omówione w dalszej części.



Rys. 2. Przykładowe zdarzenie sieciowe zaobserwowane w raporcie jednodniowym.

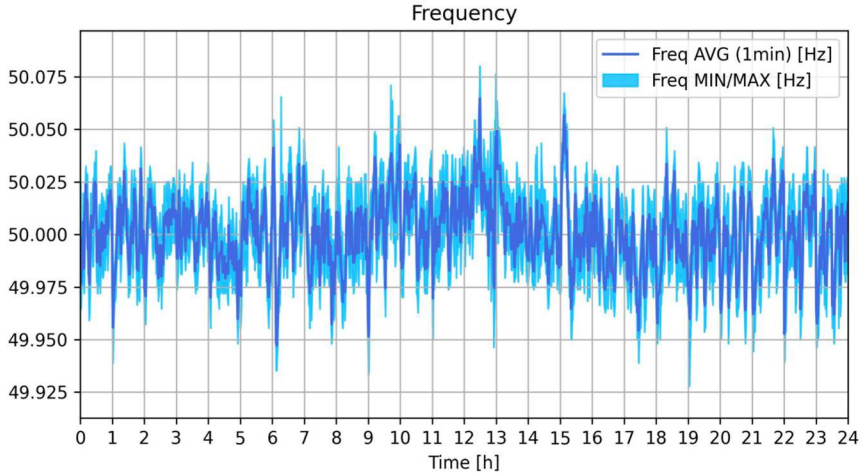
Raporty dzienne pozwalają na zapoznanie się z przebiegami zarejestrowanych wielkości oraz pobieżną analizę występujących w tym czasie zdarzeń sieciowych. Interesujący fragment może zostać pobrany z urządzenia jako plik COTRADE jednogodzinny w dużej rozdzielczości.

4. Analiza wybranych rejestracji

Rejestracje dzienne typowe

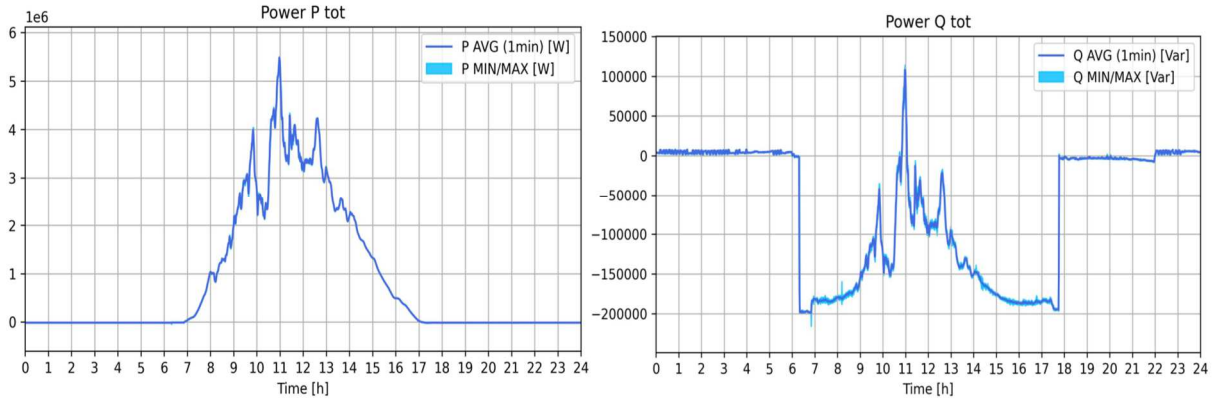
Na rys.3,4,5 przedstawiono typowe jednodniowe przebiegi wybranych rejestrowanych wielkości farmy PV. Analizując dobowe przebiegi monitorowanych i rejestrowanych wielkości pomiarowych można stwierdzić, że:

- występują chaotyczne zmiany w czasie częstotliwości w niewielkim zakresie wartości, nie przekraczającym ±75mHz od wartości znamionowej. Nie obserwuje się krótkoczasowych, znaczących zmian wartości częstotliwości – rozbieżności między wartościami chwilowymi (identyfikowanymi z rozdzielczością 20ms) a uśrednionymi w interwałach 1 minutowych są niewielkie.



Rys. 3. Pomiar częstotliwości w raporcie jednodniowym z rozdzielczością 20ms [16].

- Sygnały mocowe – mocy czynnej i biernej, również nie charakteryzują się identyfikowanymi krótkoczasowymi stanami dynamicznymi o dużym zakresie zmian wartości szczytowych. Obserwowany na rysunku 4 przebieg czasowy produkowanej mocy czynnej przez farmę fotowoltaiczną ma duże podobieństwo z przebiegiem wytwarzanej mocy biernej, co sugeruje uaktywnienie w sterowniku inwertera farmy trybu pracy zapewniającym stały stosunek mocy czynnej do biernej (tgφ=const). Rozbieżności pomiędzy wartościami „chwilowymi" a uśrednionymi są niewielkie.

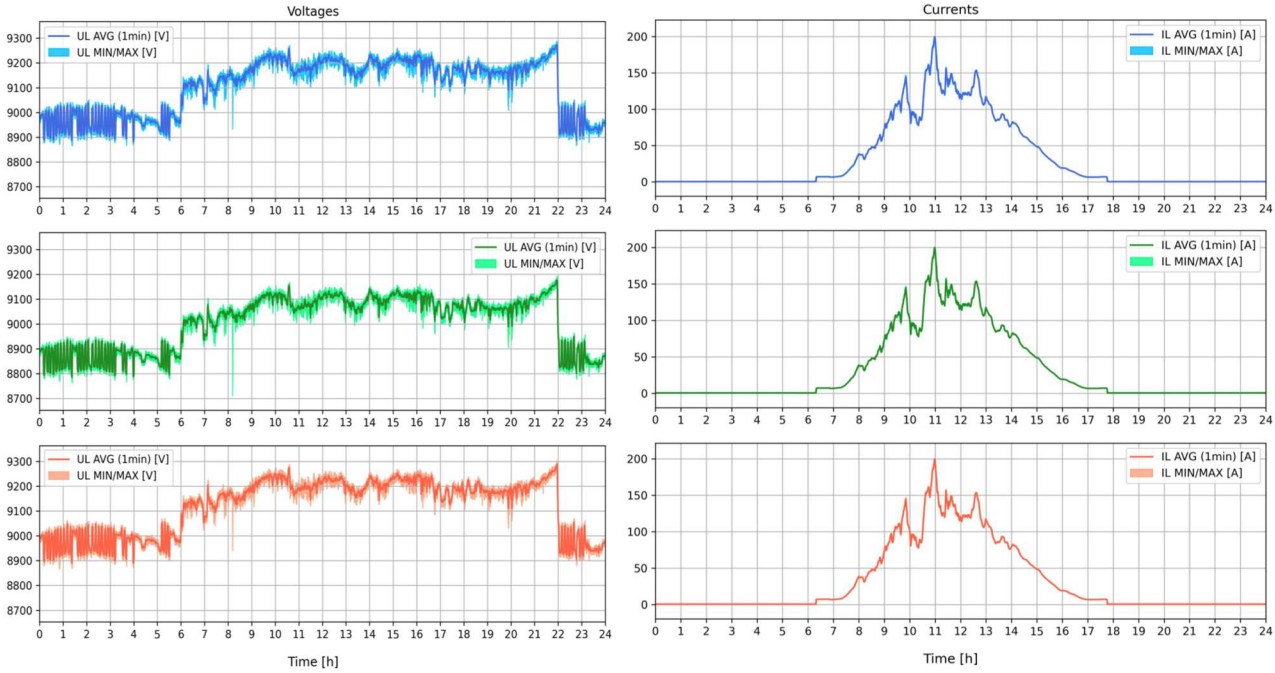


Rys. 4. Pomiar mocy czynnej i biernej w raporcie jednodniowym z rozdzielczością 20ms [16].

- Podobną sytuację obserwuje się w przebiegach czasowych sygnałów napięciowych zaprezentowanych na rysunku 5. Występuje duża dynamika zmienności wartości jednak w

niewielkim zakresie (około 100V). Zaobserwowano jeden krótkoczasowy stan nieustalony o 3 krotnie większej (około 300V) zmianie wartości sygnału. Analizując sygnały po fazowo można zauważyć ich dużą zbieżność w czasie.

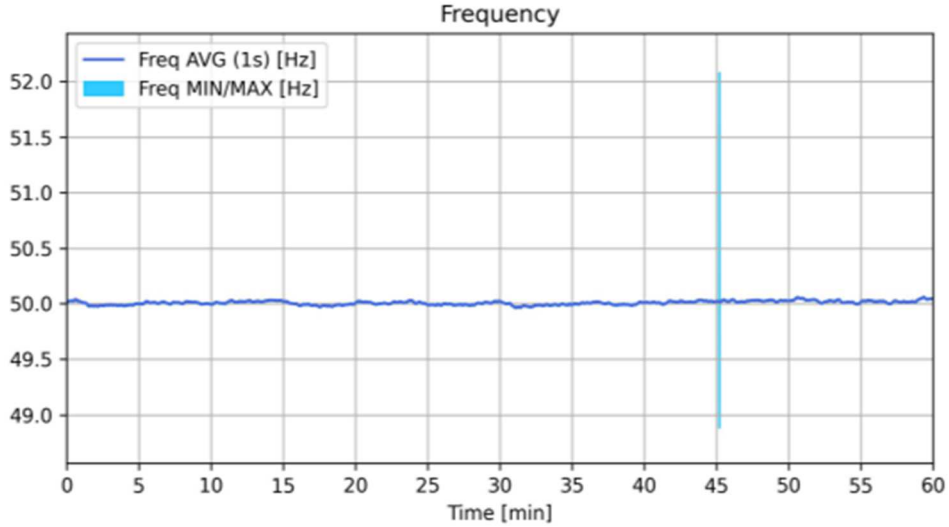
- Monitorowane w czasie prądy fazowe charakteryzują się dużą regularnością, rozbieżności pomiędzy wartościami chwilowymi a uśrednionymi są praktycznie niezauważalne. Zbieżność po fazowa przebiegów czasowych prądów identyfikuje pracę symetryczną układu co ilustruje rysunek 5 (prawa kolumna).



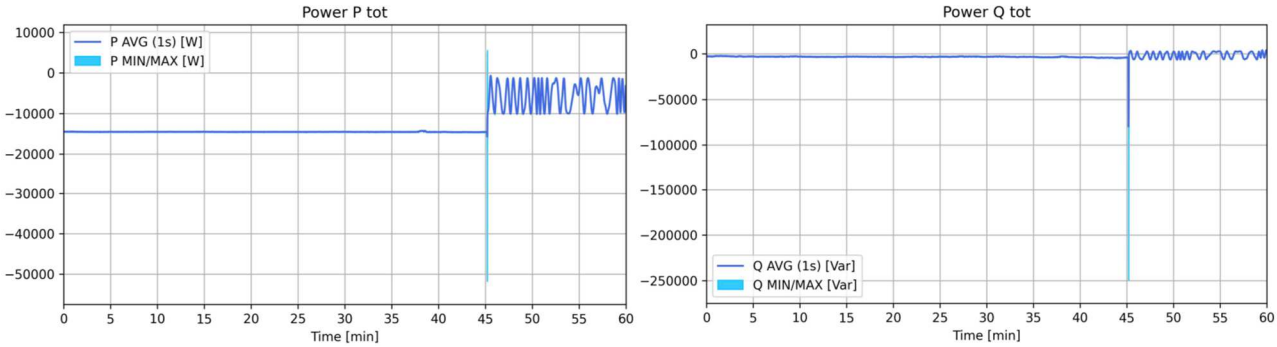
Rys. 5. Rejestracja napięć i prądów fazowych z rozdzielczością 20ms [16].

Rejestracja zakłócenia w SEE

Jak można zaobserwować na dobowych przebiegach zarejestrowanych sygnałów na rys. 2. W tym dniu wystąpiło zakłócenie w SEE pomiędzy godz. 21:00 a 22:00. Opisana funkcja rejestracji permanentnej pozwala na pogłębioną analizę tego zdarzenia poprzez pobranie pliku rejestracji jednogodzinnej w formacie COMTRADE zapisaną z rozdzielczością 20ms. Na rys. 6. przedstawiono przebieg częstotliwości z analizowanej godziny, z której wynika, że zdarzenie miało miejsce w ok. 45 minucie tej godziny. Z kolei na rysunku 7 przedstawiono przebieg mocy czynnej i biernej z analizowanej godziny.

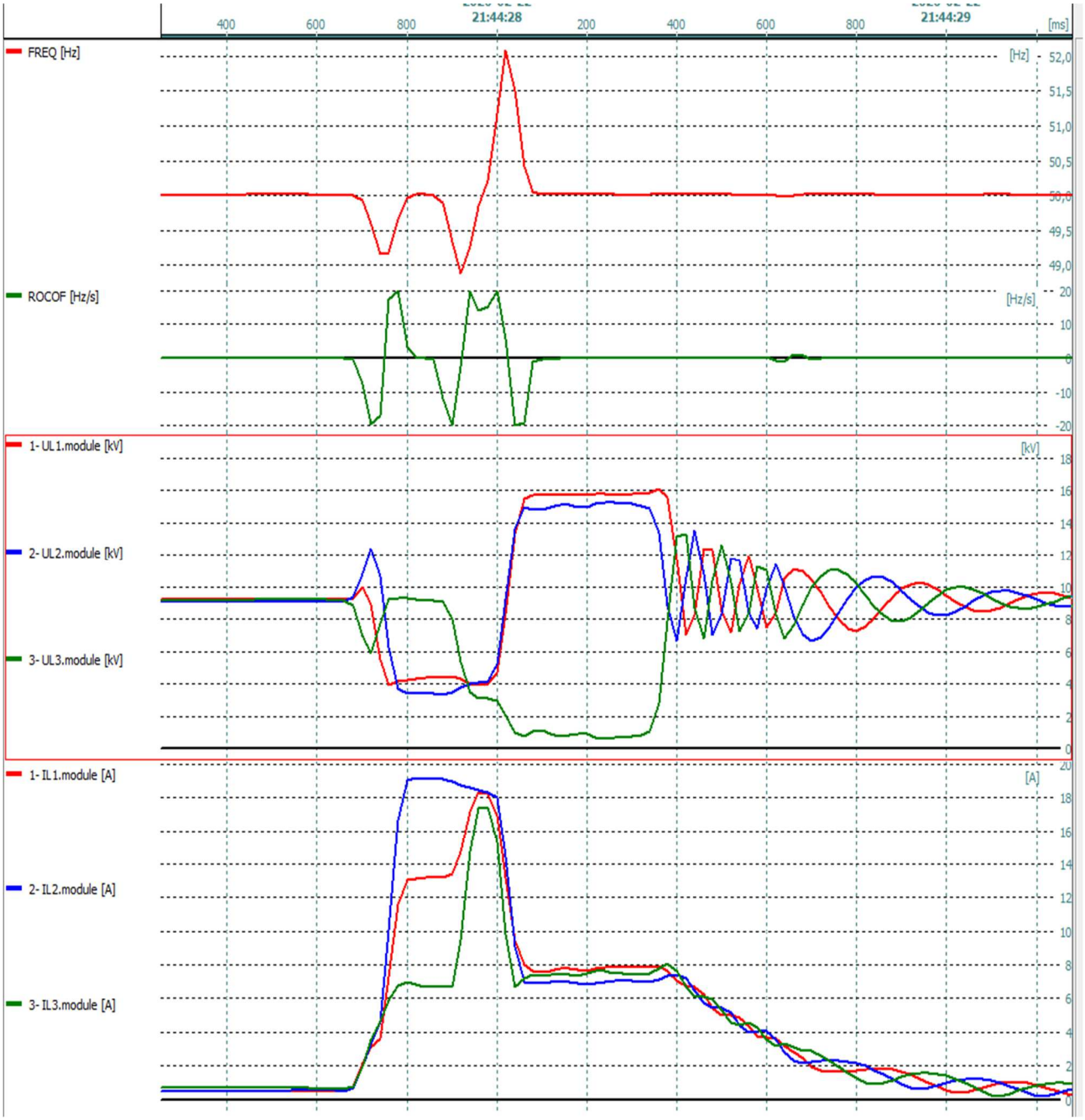


Rys. 6. Rejestracja częstotliwości z godz. 21:00-22:00 z rozdzielczością 20ms [16].



Rys. 7. Rejestracja mocy czynnej i biernej z godz. 21:00-22:00 z rozdzielczością 20ms [16].

Jak wspomniano, przebiegi są zarejestrowane z dużą rozdzielczością czasową, co pozwoliło na bardziej szczegółową prezentację graficzną zdarzenia, co pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Krótkoczasowa rejestracja zakłócenia z rozdzielczością 20ms [16].

Z rysunku 8. można wywnioskować, że miało miejsce zwarcie dwufazowe, które następnie przerodziło się w trwałe zwarcie doziemne jednej fazy. Na tej podstawie można prześledzić dynamikę odpowiedzi farmy PV na tego typu zdarzenia.

Zarejestrowane zakłócenie pokazuje jak przydatna jest funkcja rejestracji permanentnej. Bez definiowania jakichkolwiek kryteriów pobudzenia uzyskuje się dostęp do cennej informacji. W przypadku prezentowanego zakłócenia można stwierdzić (zdaniem autorów), że po krótkotrwałym zdarzeniu sieciowym (prawdopodobnie krótkie, przemijające zwarcie doziemne w fazie L3), w wyniku przepięć w fazach L1 i L2 doszło do zwarcia dwufazowego między tymi fazami. Zwarcie to zostało wyłączone po ok. 250ms, w ostatniej fazie trwania zwarcie dotknęło również fazę L3. Po wyłączeniu zwarcia dwufazowego, faza L3 w dalszym ciągu wykazywała zwarcie doziemne, co sugeruje, że zwarcia dwufazowe L1-L2 oraz L3 miały miejsce w różnych lokalizacjach. Zwarcie doziemne w fazie L3 zostało wyłączone po następnych ok. 400ms.

Analizując przebiegi prądów można wyciągać wnioski związane z reakcją farmy PV na tego typu zdarzenie, farma o tej porze nie generowała już mocy czynnej. Natomiast po zdarzeniu pojawiły się jej niewielkie oscylacje po stronie poboru. Równie ciekawy jest wyznaczony przebieg częstotliwości i jej pochodnej RoCoF. Mimo iż można się spodziewać, że w tym czasie częstotliwość globalna w SEE była niezmienna (quasistacjonarna), jej lokalna estymacja charakteryzuje się dużą dynamiką. Związane jest to z metodą estymacji częstotliwości na podstawie sygnałów lokalnych, która jest dokonywana na podstawie szybkości zmiany kątów fazowych przebiegu napięcia. Ponieważ w sytuacjach zakłóceń sieciowych w postaci zwarć mamy do czynienia z dynamiczną zmianą kątów, nie ma sposobu na uniknięcie błędów w estymowaniu częstotliwości w stosunkowo krótkich oknach czasowych.

Nawet urządzenia typu PMU, charakteryzujące się wysoką jakością pomiaru częstotliwości na podstawie składowej symetrycznej zgodnej napięcia wykazują błędy dynamiczne w przypadku zdarzeń sieciowych cechujących się szybką zmianą kąta fazowego napięcia, co pokazano na rys. 8. W początkowym momencie zwarcia zmiana kąta objawia się błędną estymacją częstotliwości w kierunku spadku częstotliwości, po wyłączeniu zwarcia sytuacja się odwraca, zmiana kąta powoduje błąd estymacji częstotliwości w kierunku wzrostu.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano przykładowe możliwości wykorzystania ciągłej rejestracji danych z jednostek PMU do identyfikacji dynamicznych zachowań OZE, na przykładzie kilkumegawatowej farmy fotowoltaicznej. Ponadto technologia PMU umożliwia jednoczesne, synchroniczne porównywanie przebiegów rejestrowanych w wielu punktach SEE. Głównym celem publikacji było wykazanie wysokiego potencjału tego typu pomiarów jako źródła cennych danych badawczych. Pozyskiwane w ten sposób informacje otwierają nowe perspektywy badawcze w zakresie oceny wpływu masowej integracji OZE na stabilność i zachowanie SEE. Umożliwiają one m.in. precyzyjną walidację oraz kalibrację modeli matematycznych farm PV.

Ponadto ciągła rejestracja parametrów pozwala na spełnienie rygorystycznych wymogów kodeksów sieciowych [12] w obszarze archiwizacji danych na potrzeby identyfikacji zakłóceń oraz weryfikacji modeli jednostek wytwórczych. Ponieważ rosnący udział OZE wpływa na obniżenie inercji systemu, operatorzy coraz częściej dostrzegają wyzwania związane z jego stabilnością, wyrażając rosnące zainteresowanie technologią Grid Forming [15].

Dynamiczny wzrost liczby instalacji OZE diametralnie zmienia warunki pracy SEE, a charakter tego wpływu nie został jeszcze w pełni rozpoznany. Choć wnioski z analizy przyczyn niedawnej wielkiej awarii systemowej (blackoutu) na Półwyspie Iberyjskim nie wskazują bezpośrednio OZE jako źródła problemu, to wyraźnie pokazały one ryzyko związane z utratą kontroli nad tymi źródłami oraz brakiem pełnej świadomości sytuacyjnej (dokładnych danych pomiarowych) po stronie operatorów. Kluczowym wnioskiem z tego zdarzenia jest fakt, że brak zsynchronizowanych w czasie danych pomiarowych znacząco utrudnił późniejszą analizę post-factum mechanizmu rozwoju awarii

i wypracowanie oraz zaproponowanie potencjalnych działań przeciwdziałających lub łagodzących występowanie takich zdarzeń.

Literatura

[1] Talaga M., Halinka A. Czy użycie sformułowania „niestabilne źródła OZE" jest właściwe. Konferencja KAE'25.
[2] Machowski J., Lubośny Z.: Stabilność systemu elektroenergetycznego, WNT, Warszawa 2018
[3] https://www.ien.gda.pl/pl/ocena-stabilnosci-pracy-systemu-ow-elektroenergetycznych
[4] https://balticwind.eu/pl/ocena-stabilnosci-sieci-energetycznych-z-wysokim-poziomem-energii-odnawialnej
[5] https://elektronikab2b.pl/fotowoltaika/54243-pv-a-stabilnosc-systemu-elektroenergetycznego
[6] Koszkul Z. Wpływ generacji na pracę elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej w systemie dystrybucyjnym. Uwarunkowania i bariery prawne i techniczne". Materiały konferencyjne, Konferencja SPIE-Energotest'2026.
[7] Szewczyk M. Wpływ struktury wytwarzania energii na selektywność i niezawodność zabezpieczeń nadprądowych w sieciach SN. Materiały konferencyjne. Konferencja SPIE-Energotest'2026.
[8] Molenda P., Talaga M. Problem identyfikacji przyczyn awarii transformatorów sieciowych SN w instalacjach fotowoltaicznych – aspekty diagnostyczne. Materiały konferencyjne. Konferencja SPIE-Energotest'2026.
[9] Quanta Technology and Oak Ridge National Laboratory, Distribution Synchronized Measurements Roadmap, Final Report. 2021.
[11] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.
[12] PSE. Zaktualizowane wymogi ogólnego stosowania (…) w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG). 2024.
[13] Rejestrator RZ50, Instrukcja Użytkowania, SPIE Energotest, 2024.
[14] Norma EC/IEEE 60255-118-1:2018. Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.
[15] Rzepka P., Szablicki M. Podejście ENTSO-E i operatorów do technologii Grid Forming. Materiały konferencyjne. Konferencja SPIE-Energotest'2026.
[16] SPIE-Energotest. Materiały własne.
[17] https://www.pse.pl/-/raport-koncowy-o-blackoucie-na-polwyspie-iberyjskim