

Poprawa obserwowalności systemu elektroenergetycznego poprzez wykorzystanie techniki synchrofazorów

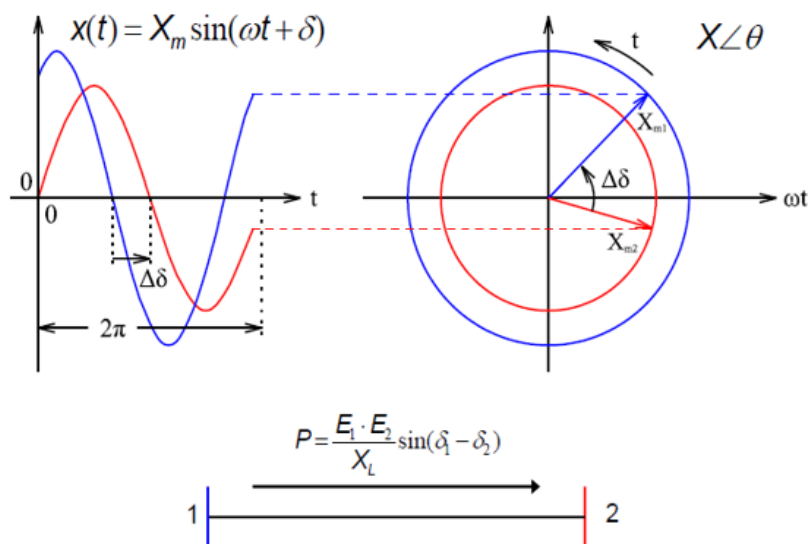
Robert Trębski, Marek Gład - PSE

Streszczenie

Technika pomiarów synchrofazorów związana jest z wykonywaniem pomiarów wektorów napięcia lub prądu, oznaczanych jednakowym znacznikiem synchronizacji czasu GPS. Oferowane obecnie urządzenia pozwalają na wyznaczanie fazy napięcia i prądu z rozdzielczością bliską 20 ms. Dysponowanie takimi pomiarami z różnych miejsc systemu energetycznego pozwala śledzić quasi on-line dynamiczne zmiany warunków jego pracy. Nie jest to możliwe w systemach dyspozytorskich typu SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), w których akwizycja pomiarów przebiega znacznie wolniej.

1. Wstęp

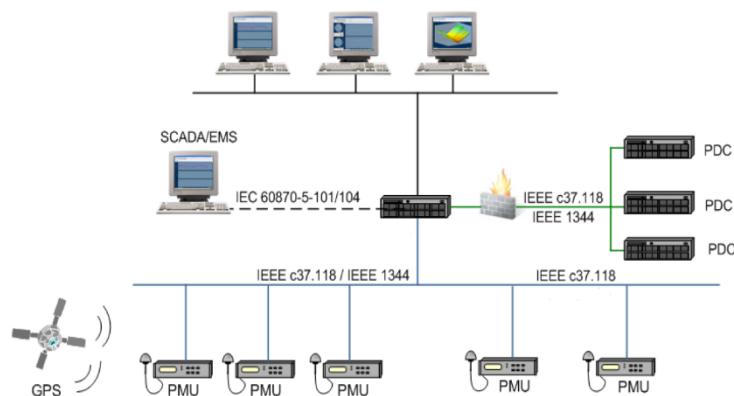
Synchrofazor (rys. 1) jest liczbą zespoloną, która reprezentuje sinusoidalną wielkość pomiarową $x(t)$ (np. prąd lub napięcie w systemie elektroenergetycznym), przy czym liczba ta jest wyznaczana na podstawie ciągu próbek wielkości mierzonej, a chwile próbkowania są synchronizowane wspólnym dla całego systemu źródłem synchronizującym [1].



Rys. 1. Interpretacja zamiany wielkości sinusoidalnej napięcia na postać wektorową na płaszczyźnie zespolonej

Fazor wielkości mierzonej $x(t)$ zawiera jej wartość skuteczną X oraz fazę θ , która jest odległością kątową wyznaczoną w odniesieniu do początku pomiaru określonego przez zewnętrzny impuls synchronizujący. Urządzenia wykonujące pomiary synchrofazorów nazywa się Phasor Measurement Unit (PMU). Na bazie PMU budowane są obszarowe systemy pomiarowe typu WAMS (Wide Area Measurement System). Wiązącymi elementami struktury WAMS są koncentratory komunikacyjne typu PDC (Phasor Data Concentrator). Przeznaczeniem PDC jest zbieranie za pośrednictwem systemów teleinformatycznych pomiarów z PMU. Zgromadzone przez PDC dane pomiarowe mogą być poddawane procesom obróbki i archiwizowania. W systemach WAMS można tworzyć różne rozwiązania funkcjonalne jednakże ich działanie w dużym stopniu zależy od dokładności zastosowanych urządzeń PMU oraz szybkiej i poprawnej transmisji z PDC. Dlatego gwarancją skuteczności systemów WAMS jest zapewnienie wysokiej przepustowości oraz małych opóźnień w transmisji pakietów danych fazy przesyłanych do PDC.

Na rys. 2 przedstawiono poglądowo zależność powiązań PMU i PDC w ramach systemu WAMS. Najprostszym rozwiązaniem połączeń WAMS jest struktura gwiazdowa, w której wszystkie PMU wysyłają swoje pomiary do jednego PDC. Po odpowiedniej obróbce PDC przekazuje dalej dane do centralnego komputera realizującego zadania określone w rozwiązaniach funkcjonalnych WAMS.



Rys. 2. Poglądowa struktura powiązań systemu WAMS

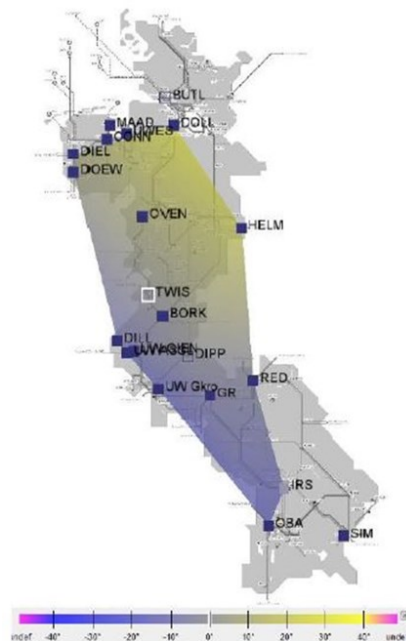
Taka struktura cechuje się prostym rozwiązaniem połączeń systemu komunikacyjnego, ale ma pewne ograniczenia, ponieważ jeden PDC może obsługiwać dane nie więcej jak z 20-30 PMU a komputer centralny może nie być w stanie dostatecznie szybko realizować wszystkich funkcji. Lepszym rozwiązaniem jest układ połączeń wielowarstwowy, gdzie wyróżnia się PDC lokalne, obejmujące zasięgiem jedną lub kilka stacji oraz PDC umiejscowione w obszarowych centrach dyspozytorskich. W takiej strukturze połączeń wykonywanie części zadań WAMS można przesunąć na poziom lokalnych PDC, współpracujących z PDC centralnymi. Może się jednak okazać, że dla wykonywania pewnych zadań lokalne PDC powinny wymieniać się danymi bezpośrednio co umożliwia połączenie ich przez sieć WAN BB.

Wiele firm oferuje urządzenia pomiarowe (PMU), często stanowiące rozszerzenie funkcji rejestratorów zakłóceń lub terminali zabezpieczeniowych, co znacznie sprawia, że implementacja tej technologii jest łatwiejsza z punktu widzenia pozyskiwania funduszy inwestycyjnych. W przypadku PDC na rynku oprócz producentów PMU znajdują się także firmy oferujące specjalistyczne rozwiązania funkcjonalne, często tworzone „pod klienta”. Największy rozwój odnotowały kraje Ameryki Północnej (USA i Kanada) oraz Azji (Chiny i Indie), gdzie ze względu na rozmiar systemów liczba zainstalowanych PMU liczona jest w setkach urządzeń. W systemach europejskich krajów zrzeszonych w ENTSO-E także znajdują się zaawansowane instalacje WAMS. Znajomość wykorzystywania pomiarów synchrofazorów dowodzi, że osiągnęła ona dojrzałość techniczną. W przypadku krajowej energetyki wprawdzie spotykane są jeszcze pojedyncze instalacje w obszarze wytwarzania i dystrybucji ale w PSE trwają obecnie prace nad badaniem korzyści ze stosowania synchrofazorów, po zakończeniu których oczekuje się wskazówek dla jej rozwoju w KSE.

2. Rozwiązania funkcjonalne WAMS

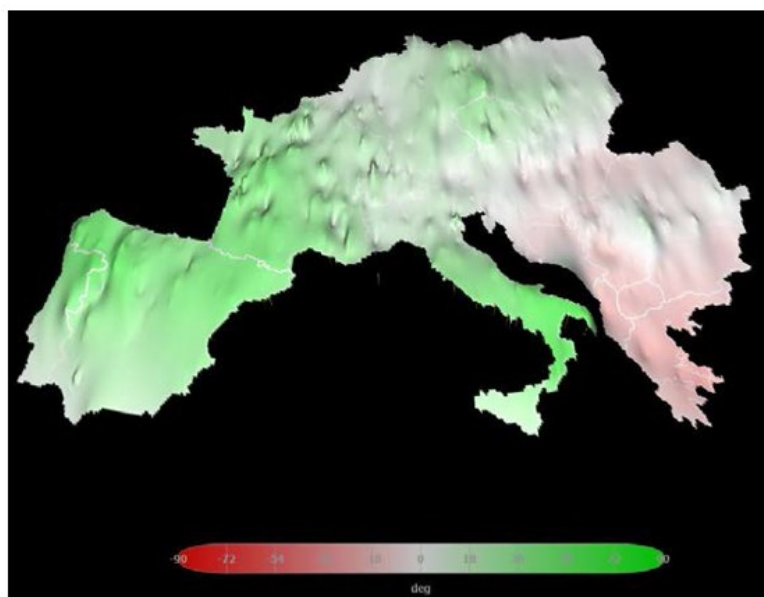
Pozyskiwanie danych fazorów z rozdzielczością 20 ms pozwala na tworzenie narzędzi do wykonywania analiz w czasie rzeczywistym dzięki czemu możliwa jest bardzo szybka ocena bezpieczeństwa pracy SEE. Jednym ze znanych rozwiązań bazującym na pomiarach synchrofazorów jest funkcja monitorowania warunków temperaturowych linii przesyłowych [2]. Warunkiem koniecznym wykonania takiej funkcjonalności jest posiadanie pomiarów PMU z obu końców linii. W oparciu o pomiar napięć i prądów po obu stronach linii wykonuje się obliczenia rezystancji linii i strat, co pozwala na oszacowanie bieżącej temperatury przewodów. Na tej podstawie wyznaczane są aktualne warunki obciążalności linii. W systemach w których budowa sieci tworzy korytarze przesyłowe wykorzystane są pomiary wektorów napięcia dla ich monitorowania. W tym przypadku porównuje się kąty fazowe wektorów napięcia z różnych miejsc lokalizacji PMU. Na podstawie różnicy kątów fazowych można łatwo analizować stan obciążenia systemu. Na rys. 3 zobrazowano przykład takiego wykorzystania PMU przez niemieckiego operatora Tennet.

Na skali oznaczono zmianą kolorów rozchyły kątów porównywanych wektorów napięć. Widoczne przebarwienia żółto-niebieskie świadczą o występowaniu dużych przesyłów mocy. Znajomość tych wielkości ma bardzo ważne znaczenie w przypadku gdyby doszło do wyłączenia (np. z powodu zwarcia) silnie obciążonej linii. Zwykle ponowne załączenie takiej linii zostanie zablokowane przez urządzenia synchrocheck, które nie pozwalają na zamykanie wyłącznika gdy zostanie przekroczony dopuszczalny rozchył kątowy. Wtedy potrzebne są odpowiednie zmiany w pracy systemu dla jego zmniejszenia, a efekt tych działań może być obserwowany za pomocą prezentowanego schematu sieci.



Rys. 3. Monitorowanie korytarza przesyłowego na podstawie wartości kątów fazorów napięcia w Tennet

Sposób „kolorowania” korytarzy przesyłowych był analizowany pod kątem utworzenia na bazie PMU operatorów systemów połączonych ENTSO-E ekranu dla informowania o występowaniu dużych przesyłów transgranicznych (taka funkcjonalność nie została jeszcze zrealizowana). Zobrazowanie pracy sieci systemów europejskich takich warunków (rys. 4) może wierać służby dyspozytorskie w koordynowaniu działań podczas wystąpienia nietłumionych międzyobszarowych kołysań mocy. Tego typu zjawiska mogą się pojawić w związku z osłabieniem połączeń transgranicznych (wzrost impedancji w związku z planowym wyłączeniem elementów przesyłowych lub w wyniku awarii) gdy trwa duży przesył pomiędzy obszarami sieci.



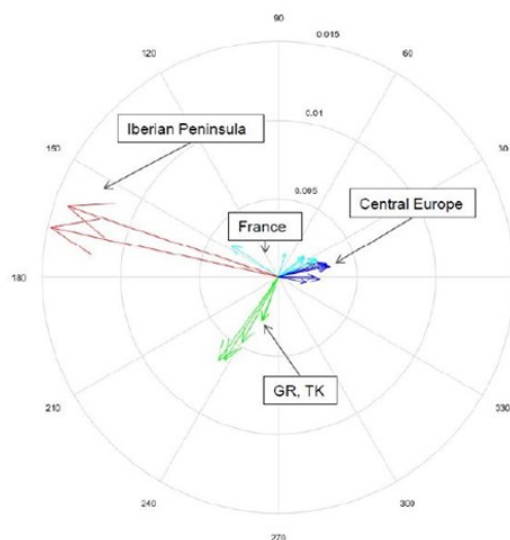
Rys. 4. Poglądowy ekran dla potrzeb monitorowania przesyłów transgranicznych w systemach ENTSO-E

Dynamiczna zmiana impedancji powoduje rozkołysanie generatorów synchronicznych. W wyniku osłabienia połączeń transgranicznych powstają podobszary sieci w których generatory tworzą koherentne grupy. Te grupy oddziałują na siebie nawzajem tak, że pomiędzy grupami generatory „kołyszą” się w fazie lub w przeciwfazie. W następstwie powstają oscylacje wielkości elektrycznych: napięcie, prąd i częstotliwość. Amplituda ich wychyleń i częstotliwość zmian zależy m.in. od tego na ile mocno są powiązane podobszary sieci oraz jaka ilość mas wirujących uległa rozkołysaniu. Im słabsze połączenia transgraniczne tym łatwiej wytrącić z równowagi generatory synchroniczne. Natomiast mały udział mas wirujących zarówno po stronie wytwarzania jak i odbioru energii elektrycznej pogarsza szanse na samoczynne wytłumienie kołysań.

Kołysania są groźne dla części mechanicznych wałów turbozespołów i powinny być możliwie jak najszybciej wytłumione. Wskutek nietłumionych kołysań między grupami generatorów, szczególnie narażone są linie wymiany międzyobszarowej, często bardzo mocno obciążone. Ich wyłączenie wskutek kołysań może prowadzić do awarii systemowej. W związku z tym wymaga się, aby generatory synchroniczne przyłączone do sieci przesyłowej były wyposażone w układy stabilizatorów systemowych (Power System Stabilizer). Zadaniem ich jest wymuszenie takich zmian generowanej mocy, aby w ich wyniku kołysania ulegały tłumieniu. Niestety sytuacja może pogorszyć wzrost w bilansie wytwarzania udziału generacji rozproszonej w sieci dystrybucyjnej, ponieważ nie jest ona w stanie wytłumić takich kołysań.

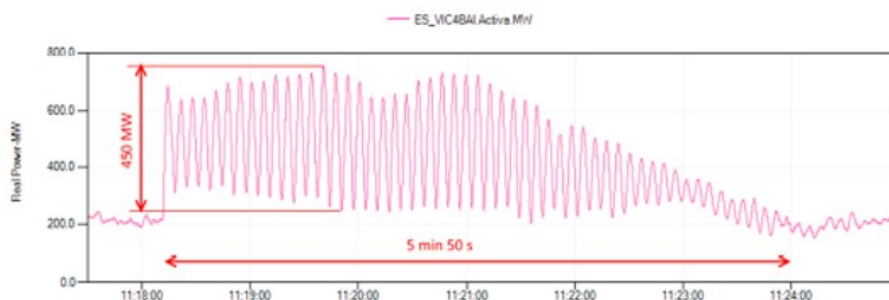
2.1. Monitorowanie pracy systemu połączonego

Systemy WAMS znajdują praktyczne zastosowanie w procesie wspomagania pracy ośrodków dyspozytorskich. Przykładem tego jest sytuacja w systemie ENTSO-E CE w dniu 1 grudnia 2016 r. związana z wystąpieniem nietłumionych kołysań międzyobszarowych [3]. Zjawisko to zostało zaobserwowane tuż po tym jak jedna z linii transgranicznych 400 kV na połączeniu systemów Francji i Hiszpanii o godz. 11:18 uległa wyłączeniu w wyniku zwarcia. W chwili zakłócenia system ENTSO-E pracował w warunkach szczytowego obciążenia, przy czym realizowany był eksport mocy czynnej w kierunku od Portugalii i Hiszpanii do Francji, a równolegle trwał export do obszaru Europy środkowej i import z obszaru Europy wschodniej. Wyłączenie linii spowodowało gwałtowne osłabienie korytarza przesyłowego oraz wzrost impedancji między systemami Półwyspu Iberyjskiego (Hiszpania, Portugalia), a systemem francuskim. Powyższe czynniki przyczyniły się do wzrostu przesunięcia wektorów napięć mierzonych przez systemy WAMS operatorów ENTSO-E, w konsekwencji czego spadła skuteczność tłumienia powstałych kołysań. Dowodzą tego przesunięcia fazowe o blisko 70° fazorów napięcia zmierzonych w systemie Turcji i systemach Hiszpanii i Portugalii (rys. 5).



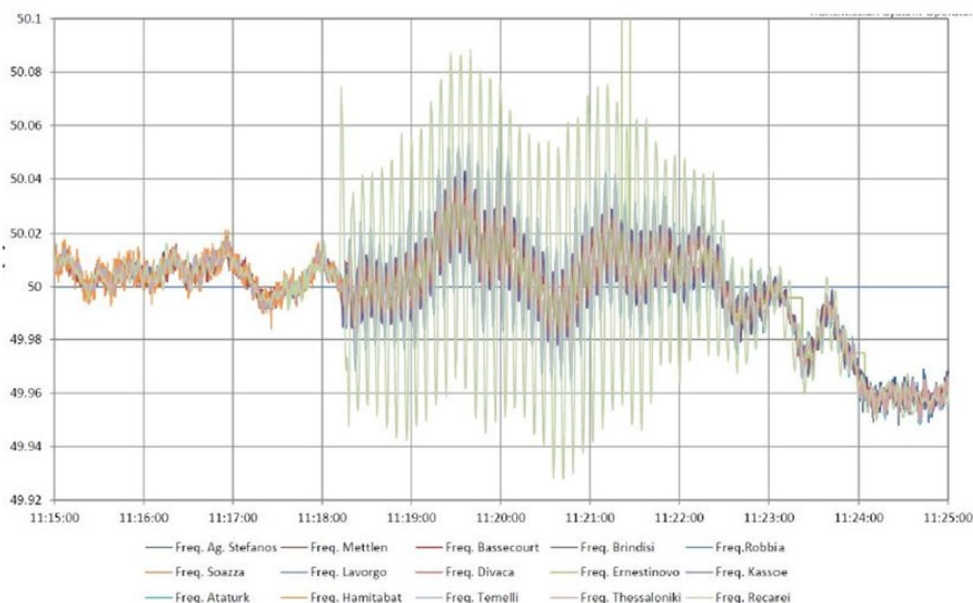
Rys. 5. Układ fazorów napięcia zmierzonych w systemach ENTSO-E podczas zakłócenia 1.12.2016 r.

Generatory w systemach Hiszpanii i Portugalii kołysały się w przeciwfazie względem generatorów w pozostałej części systemów europejskich. W wyniku kołysań generatorów następowały zmiany mocy w liniach przesyłowych. Największą amplitudę wychYLENIA mocy czynnej ok. 450 MW, zarejestrowano pomiędzy systemami Francji i Hiszpanii (rys. 6).



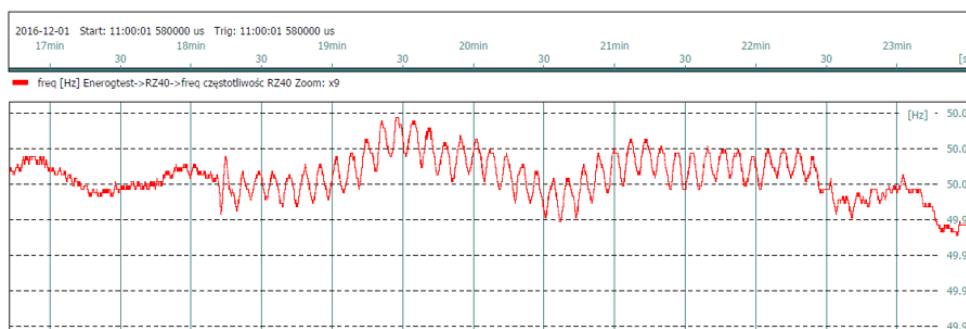
Rys. 6. Kołysania mocy czynnej na linii 400 kV Vic-Baixas podczas zakłócenia 1.12.2016 r.

Największa zmiana częstotliwości systemu, wynosząca ± 140 mHz między szczytowymi punktami przebiegu, miała miejsce na Półwyspie Iberyjskim (rys. 7).



Rys. 7. Przebieg zmian częstotliwości w wybranych lokalizacjach systemu ENTSO-E podczas zakłócenia w dniu 1.12.2016 r.

Systemy rejestracji w KSE także zaobserwowały zmiany częstotliwości, ale ich przebieg miał znacznie mniejszą amplitudę (rys. 8). Nietłumione oscylacje trwały tylko pięć minut dzięki bardzo szybkiej reakcji służb ruchowych operatorów Hiszpanii REE i Francji RTE. Operator hiszpański REE dysponując możliwością obserwowania w systemie WAMS trendów zmian częstotliwości z wybranych miejsc swojego systemu, przeprowadził w porozumieniu z operatorem francuskim RTE szybką zmianę sald, co pozwoliło mu zmniejszyć o połowę export do Francji.

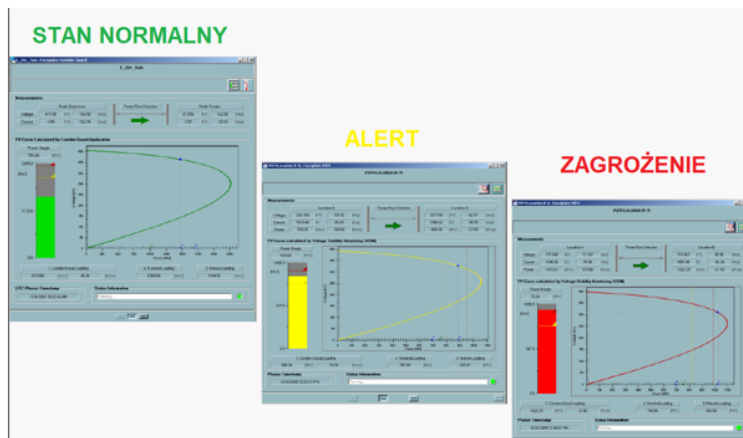


Rys. 8. Przebieg zmian częstotliwości zarejestrowanej w ESP Żarnowiec w dniu 1.12.2016 r.

2.2. Monitorowanie stabilności napięciowej

Monitorowanie większych obszarów sieci z wykorzystaniem PMU znalazło też zastosowanie przy identyfikacji stanów zagrażających niestabilności napięciowej. Dla oceny stabilności napięciowej istotna jest znajomość zarówno wartości napięć w węzłach sieci jak i ich rozchylenia kątowe. Niestabilność napięciowa przeważnie objawia się lawinowym zmniejszaniem wartości napięcia głównie w węzłach sieci rozdzielczej, a także czasem w sieci przesyłowej. Dlatego ostrzeganie o zagrożeniu stabilności napięciowej i przeciwdziałanie jej powstawaniu powinno odbywać się z możliwym wyprzedzeniem i z poprawną identyfikacją miejsca w systemie, którego może dotyczyć. Obecnie realizuje się to w systemach SCADA poprzez adaptowanie specjalnych funkcji EMS. Dzięki pomiarom PMU można udoskonalić te funkcje m.in. zwiększając dokładność estymacji stanu SEE, na bazie której w EMS wykonywane są analizy stabilności napięciowej SEE. Jednakże, aby można było podjąć działania zapobiegawcze, obliczenia muszą przebiegać bardzo szybko, niemalże w tle rzeczywistego przebiegu zjawisk w SEE. Dlatego powyższe zagadnienie wiąże się potrzebą wykorzystania różnych technik analitycznych i numerycznych w oparciu o sieci neuronowe, drzewa decyzyjne, modelowanie trajektorii systemu itp. Najprostszym wariantem wykorzystania pomiarów

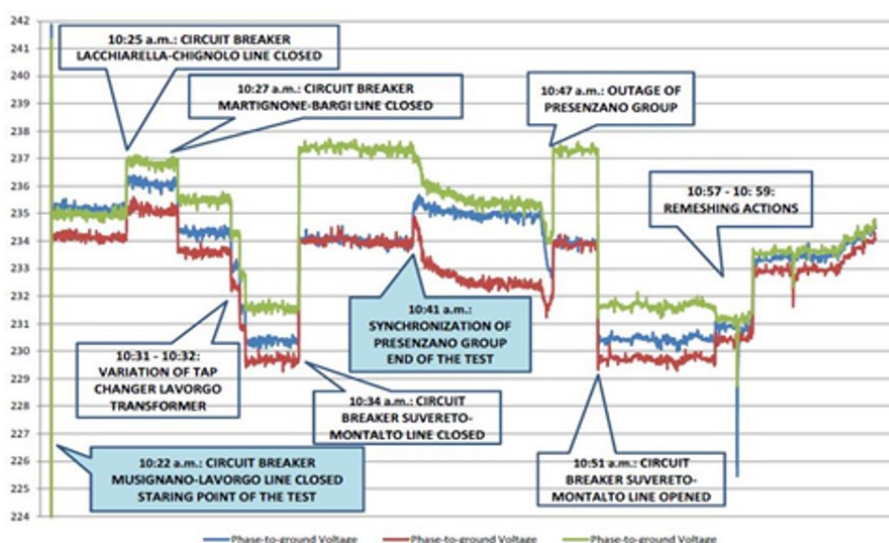
fazorów jest monitorowanie tzw. punktów pracy na charakterystykach zależności napięcia od zapotrzebowania na moc bierną $U(Q)$ tzw. „krzywych nosowych” (rys. 9) [3]. Odpowiednie sparametryzowanie punktów charakterystyki $U(Q)$ pozwala wcześniej wykrywać stan, w którym uznaje się, że zapas stabilności napięciowej ulega wyczerpaniu (alert) lub osiągnął poziom krytyczny (zagrożenie) z punktu widzenia możliwości gwałtownej zmiany napięcia tj. powstania lawiny napięciowej.



Rys. 9. Przykład możliwości zobrazowanie krzywych nosowych $U(Q)$ na bazie rozwiązania firmy ABB

2.3. Wspomaganie procesu odbudowy

Kolejnym przykładem wykorzystania pomiarów PMU wykazał się niedawno włoski operator systemu przesyłowego Terna, wykonując monitorowanie napięć na wydzielonym ciągu dla potrzeb przeprowadzenia eksperymentu związanego z próbą uruchomienia elektrowni w warunkach odbudowy po blackoutie [2]. W ramach testu podawano napięcie do elektrowni zlokalizowanej mniej więcej w połowie Półwyspu Apenińskiego, przez wydzielony ciąg o długości blisko tysiąca kilometrów, którego początek miał u operatora szwajcarskiego SwissGrid. Przedsięwzięcie stanowiło ogromne wyzwanie w kwestii regulowania napięć w poszczególnych fazach eksperymentu. Na rys. 10 zilustrowano zarejestrowane zmiany napięcia w trakcie testu, pozyskiwane z PMU w węzłach zlokalizowanych na ciągu rozruchowym. Terna posiada bardzo zaawansowane doświadczenie w dziedzinie synchronfazorów, którego początek nastąpił po blackout jaki miał miejsce w 2003 r. Po tym zdarzeniu zdecydowano się wyposażyć szereg stacji w układy PMU, aby monitorować stany zagrażające stabilności systemu, w szczególności związane z ryzykiem gwałtownego powstania deficytu mocy (Włochy importują duże ilości energii). W zbudowanym systemie WAMS zostały zrealizowane funkcje ostrzegania, a także automatycznego odciażania systemu, tak by nie dopuścić do wyłączania odbiorców na większą skalę na skutek działania SCO.



Rys.10. Wartości napięć zarejestrowane przy wykorzystaniu pomiarów PMU do monitorowania napięcia na wydzielonym ciągu rozruchowym w Terna

3. Wnioski

Przedstawione powyżej przykłady pokazują jedynie pewną część możliwości adaptacji techniki pomiarów synchronfazorów dla potrzeb poprawy obserwowalności pracy SEE. Zmiany związane z rozwojem rynku energii powodują, że w przypadku powstania różnego zbiegu okoliczności i kombinacji pewnych czynników warunki stabilności mogą nagle ulec pogorszeniu. Przesył energii na duże odległości, przy wzroście impedancji (osłabione połączenia graniczne), przyczynia się do zmniejszenia zdolności systemu do tłumienia oscylacji międzyobszarowych. Co więcej coraz większy udział generacji rozproszonej, przyłączonej do sieci poprzez układy konwertorowe powoduje, że ilość źródeł konwencyjnych jest znacznie mniejsza a ich praca jest często na granicy minimum technicznego, gdzie PSS-y są wyłączone albo mało efektywne. Posiadany tradycyjny potencjał w systemie, który w naturalny sposób tłumy kołysania jest dostępny znacznie rzadziej co powoduje, że system przy wystąpieniu dodatkowych niekorzystnych czynników jest podatny na negatywny wpływ kołysań. Możliwość wczesnego wykrywania wystąpienia powyższych zależności jest bardzo pożądaną cechą, a jak widać, dzięki zastosowaniu techniki pomiarów synchronfazorów jest to możliwe. Niezależnie od potrzeb związanych z funkcjonalnością o charakterze on-line, rejestracje z PMU wspomagają prowadzenia analiz typu ex-post, wykonywanych głównie w ramach walidacji modeli dynamicznych.

Literatura

- [1] Babś A, Gurzyński J., Kajda Ł., Świdorski J., Tarasiuk M.: „Przegląd rozwiązań WAMS” Praca na zlecenie PSE SA, 2016 r.
- [2] Wide Area Monitoring - current Continental Europe TSOs applications overview. System Protection & Dynamics Working Group 20.09. 2015
- [3] Analysis of CE inter-area oscillations of 1st December 2016. ENTSO-E SG SPD report 13.07.2017
- [4] PSGuard wide area monitoring system. Guarding the future electrical grid. Materiały firmowe ABB

