

Monitorowanie jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem supraharmonicznych oraz synchronfazorów

Streszczenie. W artykule przedstawiono prace badawczo-rozwojowe w obszarze monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE). Działania realizowane są w ramach projektu NCBR. Obecnie realizacji podlega etap I projektu. Dotyczy pomiarów i rejestracji oraz analizy JDEE z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz z wykorzystaniem techniki synchronfazorowej w sieciach dystrybucyjnych. Końcowym rezultatem projektu jest opracowanie i zbudowanie nadrzędnego systemu, integrującego różnego typu dane z różnych podsystemów.

Abstract. The article presents research and development works in the area of monitoring of power quality. The activities are carried out within the NCBR project. Currently, stage I of the project is being implemented. It concerns measurements and recordings as well as analysis of the power quality, including the extended band up to 150 kHz (supraharmonics) and synchrophasors in distribution networks. The final result of the project is the development and build of a superior system, integrating a wide range of data from several subsystems. (**Monitoring the power quality, including supraharmonics and synchrophasors**).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, rozproszone systemy monitorowania, pomiar supraharmonicznych w pasmie do 150 kHz, pomiar synchronfazorów PMU.

Keywords: power quality, distributed power quality monitoring systems, supraharmonics measurement in the band 150 kHz, synchrophasor measurement PMU.

Wstęp

Jednym z istotnych aspektów wdrażania koncepcji inteligentnych sieci elektroenergetycznych smart grids jest budowa systemów pomiarowych służących do monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych. Ciągłe monitorowanie wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej (W-JDEE) jest ważną i pożądaną ich funkcjonalnością. Z koncepcją smart grids związane jest wykorzystanie rozproszonych, w tym odnawialnych, źródeł energii (RZE, OZE), zasobników energii oraz tworzenie mikrosieci i klastrów energii. Przyłączanie coraz większej liczby RZE zmienia warunki pracy systemu elektroenergetycznego i wiąże się z występowaniem zjawisk, które mogą pogarszać jakość dostawy energii elektrycznej. Jednocześnie, takie źródła mogą stanowić potencjalne środki do kompensacji zaburzeń elektromagnetycznych oraz poprawy bezpieczeństwa energetycznego. Charakterystyczną właściwością OZE jest zmienny, zależny np. od warunków atmosferycznych, poziom generacji energii elektrycznej. Z tego powodu OZE mogą mieć wpływ na zmiany parametrów pracy sieci elektroenergetycznych, tym silniejszy, im większy mają udział w sumarycznej generacji. W tego typu systemach zasilania mamy do czynienia z dwukierunkowym przepływem energii elektrycznej. Wdrażanie koncepcji smart grids ma również na celu zwiększenie efektywności energetyki rozproszonej (popytowo-podażowej). Istotną kwestią jest m.in. przeniesienie akcentu w skali społecznej z wytwarzania energii na zarządzanie energią, zwłaszcza w dziedzinach użytkowania energii elektrycznej oraz jej transportu. Otwiera to możliwość tworzenia tzw. wirtualnych źródeł energii elektrycznej (ang. virtual power plant, VPP). Właśnie dzięki rozwojowi systemów pomiarowych źródła typu VPP mogą być tworzone za pomocą odpowiednich narzędzi software'owych [1]. Systemy ciągłego monitorowania (SCM) W-JDEE pozwalają na pozyskiwanie cennych informacji o rzeczywistym stanie pracy monitorowanego systemu elektroenergetycznego. Mogą stanowić podstawę decyzji związanych z modernizacją i rozbudową istniejącej infrastruktury elektroenergetycznej. Systemy te umożliwiają też prowadzenie badań o charakterze statystycznym oraz kompleksową analizę i ocenę JDEE, i to w długim okresie. Znaczenie SCM W-JDEE podkreślane jest w wielu

publikacjach opracowanych w ostatnich latach przez międzynarodowe grona specjalistów. Przykładowo eksperci CEER (ang. Council of European Energy Regulators) rekomendują, aby urząd regulatora sektora energetycznego zachęcał operatorów do rozszerzania zakresu ciągłego monitorowania jakości napięcia. Monitoring powinien umożliwić m.in. weryfikację zgodności jakości napięcia z obowiązującymi wymaganiami, a odbiorcy powinni otrzymać informację o rzeczywistym i oczekiwanym poziomie jakości napięcia w sieci [2]. Eksperti CIGRE i CIREC powołali pod koniec 2010 roku grupę roboczą JWG C4.112. Prace tej grupy dotyczą opracowania spójnych wytycznych dla całego procesu budowy systemów monitorowania JDEE. Podkreślono, że jest to proces złożony i wieloaspektowy [3],[4],[5]. Efektem prac jest raport [6], w którym opisano szereg istotnych aspektów związanych z monitorowaniem JDEE. Jednoznacznie wskazano na konieczność prowadzenia dalszych prac w tym obszarze. Ich celem powinno być uzyskanie pogłębionej wiedzy i znalezienie odpowiednich rozwiązań wielu zaobserwowanych problemów oraz znalezienie odpowiedzi na szereg istotnych kwestii. W I Krajowym raporcie porównawczym nt. JDEE [7] podkreślono, że proces budowy rozproszonych systemów monitorowania jest procesem nieuniknionym. Prace nad budową takich systemów należy podjąć jak najwcześniej, zaczynając w pierwszej kolejności od opracowania koncepcji i bilansu potrzeb sprzętowych. W raporcie grupy roboczej JWG C4.24 [8] zwrócono uwagę m.in. na zagadnienia związane z monitorowaniem i analizą nowych typów zaburzeń związanych z pasmem od 2 kHz do 150 kHz, tj. supraharmonicznych. Natomiast w raporcie WG C4.34 [9],[10] podkreślono rozwój systemów pomiarów synchronfazorowych w sieciach dystrybucyjnych ze znaczącym nasyceniem rozproszonej generacji w celu obserwacji i kontroli tych sieci w czasie rzeczywistym.

Prace badawczo-rozwojowe w obszarze monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej

Enea Operator (operator systemu dystrybucyjnego, OSD) podjął prace w obszarze SCM W-JDEE we współpracy z AGH Akademią Górniczo-Hutniczą z Krakowa (AGH). W tym celu opracowany i uruchomiony został projekt pt. „System bilansowania mocy i energii oraz

monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii”. Projekt realizowany jest w ramach II konkursu Programu Badawczego Sektora Elektroenergetycznego „PBSE”, NCBR. W ramach projektu wykonane zostaną prace badawczo-rozwojowe oraz eksperymentalne w obszarach:

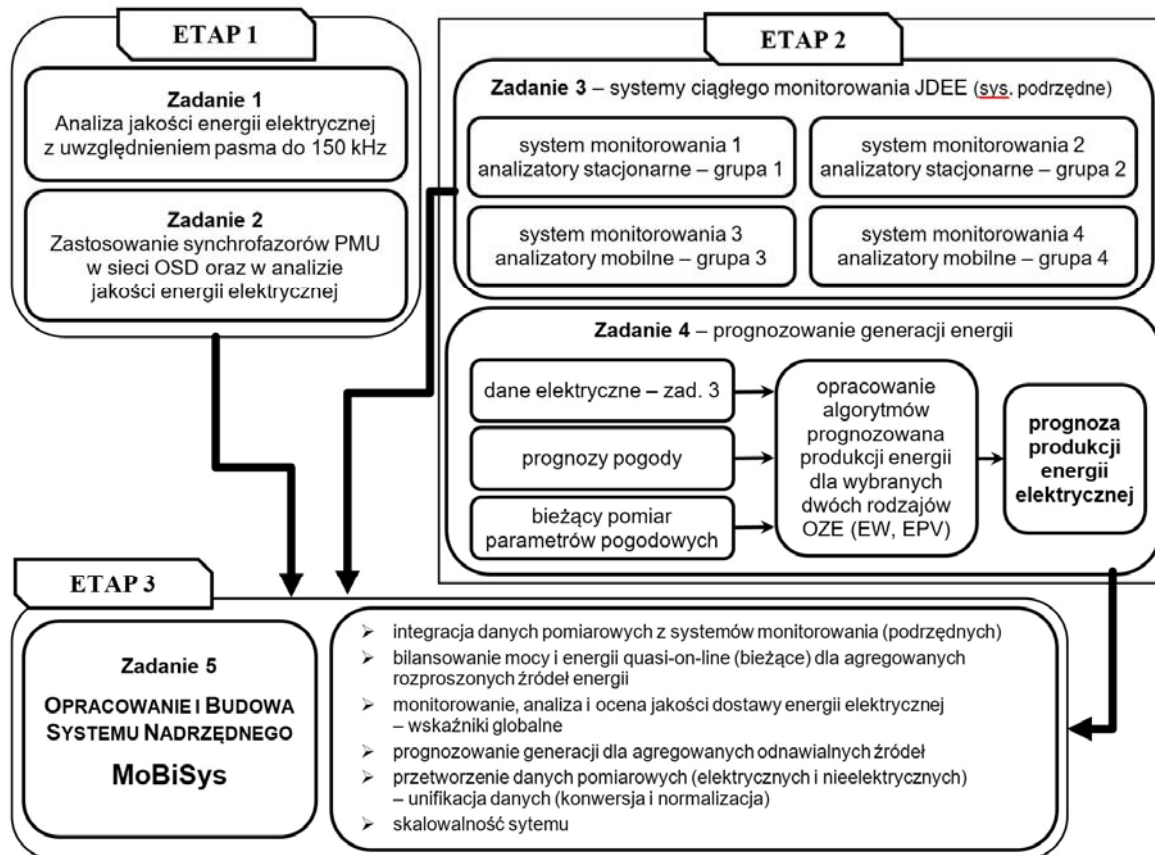
- zadanie 1 analizy jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz,
- zadanie 2 wykorzystania techniki synchronizacji w monitorowaniu i analizie JDEE dla potrzeb sieci dystrybucyjnych,
- zadanie 3 opracowania koncepcji i budowy instalacji pilotażowej SCM W-JDEE oraz ciągłego bilansowania mocy i energii wprowadzanej do systemu elektroenergetycznego OSD przez wybrane RZE oraz zasobniki energii elektrycznej,
- zadanie 4 opracowania systemu prognozowania generacji energii ze źródeł odnawialnych dla elektrowni wiatrowej EW i elektrowni fotowoltaicznej EPV,
- zadanie 5 budowy demonstratora (pilotaż) nadrzędnego systemu informatycznego przeznaczonego do integracji i przetwarzania danych pomiarowych oraz do bilansowania mocy i energii wybranych RZE i zasobników energii elektrycznej.

Realizację projektu podzielono na trzy etapy. Na rysunku 1 pokazano diagram prezentujący strukturę projektu. W ramach etapu I przeprowadzone zostaną pomiary z wykorzystaniem sześciu analizatorów JEE z poszerzonym pasmem do 150 Hz (zadanie 1). Uruchomiony zostanie również pilotażowy system pomiarowy złożony z czterech jednostek synchronizacji PMU (ang. phasor measurement unit) (zadanie 2). W ramach etapu II zbudowany i uruchomiony zostanie SCM W-JDEE bazujący na 90 analizatorach (stacjonarnych i

mobilnych), które zostaną do tego celu zakupione. Dzięki temu zbudowany zostanie SCM W-JDEE (zadanie 3). Opracowane zostaną pilotażowe systemy prognozowania generacji energii dla EW i EPV z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji (zadanie 4). Do tego celu niezbędne są dane dotyczące parametrów pogodowych, zarówno pomiary bieżące jak i historyczne). Pilotażem zostanie objętych kilka wybranych węzłów w sieci Enea Operator. Końcowym rezultatem projektu, zaplanowanym w etapie III, jest opracowanie i zbudowanie nadrzędnego systemu informatycznego MoBiSys, którego zadaniem będzie integracja danych (elektrycznych i nieelektrycznych) z mobilnych i stacjonarnych analizatorów, synchronizatorów, systemów prognozowania produkcji energii z OZE. W chwili obecnej projekt jest w trakcie realizacji etapu 1.

Pomiary i rejestracje w paśmie od 9 kHz do 150 kHz – supraharmoniczne

Zaburzenia w paśmie 2-150 kHz są obecnie tematem intensywnych prac badawczych [8]. W literaturze opisano przypadki zakłócenia działania pracy różnych urządzeń. Szczególnie zakłócenia komunikacji PLC (ang. power line communication) są istotne, gdyż jest ona wykorzystywana do komunikacji z licznikami typu smart. Jednym z czynników utrudniających komunikację są zaburzenia napięcia w paśmie powyżej 9 kHz. Pojęcie supraharmoniczne zostało zaproponowane w publikacji [15]. Odnosi się do wszystkich składowych (odkształceń) napięcia lub prądu w zakresie częstotliwości od 2 do 150 kHz. Do pomiarów w dziedzinie czasu zalecany jest oscyloskop z filtrem antyaliasingowym i odpowiednimi dodatkowymi filtrami. Należy uwzględnić odpowiedź częstotliwościową sond prądowych, aby upewnić się, że są one odpowiednie dla częstotliwości do 150 kHz.

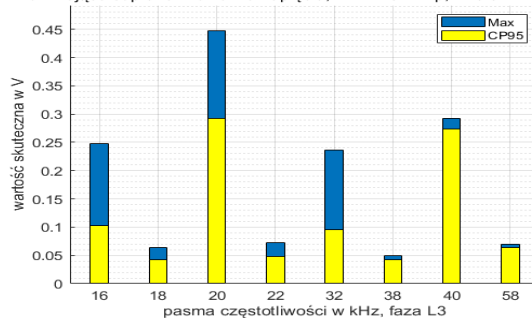


Rys.1. Struktura projektu pt. „System bilansowania mocy i energii oraz monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii – MoBiSys”

Pomiary tego typu będą miały najczęściej charakter doraźny, krótkotrwały i wymagają odpowiednich warunków zewnętrznych ze względu na ograniczenia danego oscyloskopu. Pomiary i długotrwałe rejestracje supraharmonicznych w warunkach sieci dystrybucyjnych wymagają zastosowania innego rodzaju przyrządu pomiarowego. Nie mogą być wykonywane przy użyciu dowolnego analizatora jakości energii elektrycznej, gdyż standardowo nie posiadają takiej funkcjonalności. Zastosowany analizator musi zapewniać wystarczająco wysoką rozdzielczość amplitudową i częstotliwość próbkowania. Dodatkowo musi mieć zaimplementowane odpowiednie algorytmy obliczeniowe. W sieciach SN należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność indukcyjnych przekładników napięciowych. Istnieje kilka czynników, które wpływają na ich odpowiedź częstotliwościową, a możliwy błąd ma tendencję do narastania wraz z częstotliwością. W sieciach o napięciu nominalnym 20 kV i wyższym dokładność przekładników napięciowych jest najczęściej nie do przyjęcia dla częstotliwości powyżej 2 kHz [16],[14]. Techniki pomiarowe i opis instrumentów w zakresie supraharmonicznych objęte są dwoma normami: PN-EN 61000-4-7 i CISPR 16. PN-EN 61000-4-7 obejmuje dolny zakres (2-9 kHz), a zaproponowaną metodę należy traktować jako wskazówkę. Częstotliwości 9-150 kHz nie są omawiane. Proponowaną metodą jest zastosowanie przyrządu do próbkowania w dziedzinie czasu z filtrem górnoprzepustowym rozpoczynającym się od 2 kHz do tłumienia częstotliwości systemu elektroenergetycznego, a także dominujących harmonicznym niższego rzędu. Zaleca się, aby tłumienie częstotliwości podstawowej przekraczało 55 dB. Norma PN-EN 61000-4-7 zaleca ponadto przyjęcie prostokątnego okna akwizycji danych wynoszącego 200 ms sygnału, który jest następnie przetwarzany w celu ustalenia składowych w dziedzinie częstotliwości. Skutkuje to rozdzieleniem pasm częstotliwości 5 Hz, które następnie zostaną pogrupowane w pasma 200 Hz, w celu zharmonizowania z dolnym pasmem częstotliwości CISPR 16, poczynając od 9 kHz. Normy CISPR 16 i PN-EN 61000-4-7 mają inne podejście do sposobu realizacji pomiarów. Norma CISPR 16 zaleca pomiary z odbiornikiem pomiarowym. W załączniku do normy PN-EN 61000-4-30 ed.3 zaproponowano kolejną metodę pomiaru supraharmonicznych w paśmie 9-150 kHz. Jednak metoda ta obejmuje tylko około 8% sygnału i zapewnia pasma 2 kHz zamiast pasm 200 Hz [17],[14]. W ramach projektu rozważano zastosowanie kilku przyrządów pomiarowych: PQube 3.0 Power Standards Lab, SICAM Q200 Siemens, MFA500 SWEMET, PQ-Box 300 A.Eberle, DEWESoft Power Analyzer oraz Artemes AM-10-PA2-H. Ostatecznie wybrano PQ-Box 300. Przyrząd ten jest mobilnym analizatorem jakości energii elektrycznej klasy A zgodnie z PN-EN 61000-4-30 ed.3. Został wyposażony w 24-bitowe przetworniki A/D dla pomiaru napięć i prądów. Pomiar i rejestrację napięć realizuje z częstotliwością próbkowania 409,6 kHz. Według jego specyfikacji technicznej umożliwia analizę składowych do 170 kHz, z zastosowaniem podziału na dwa pasma 2-9 kHz (przedziały 200 Hz) i 8-170 kHz (przedziały 2000 Hz). W przypadku prądów, pomiary i rejestracje wykonywane są z częstotliwością próbkowania 40,96 kHz. Możliwa jest wówczas analiza składowych do 9 kHz (przedziały 200 Hz). W tzw. trybie „online/oscyloskopowym” PQ-Box 300 umożliwia analizę widma dla napięć i prądów do 20 kHz z zastosowaniem przedziałów 5 Hz. Natomiast analizę supraharmonicznych realizuje w przedziale od 8 kHz do 170 kHz z zastosowaniem przedziałów 200 Hz. Agregacja danych realizowana jest zgodnie z PN-EN 61000-4-30. Długość interwału agregacji jest konfigurowalna przez użytkownika.

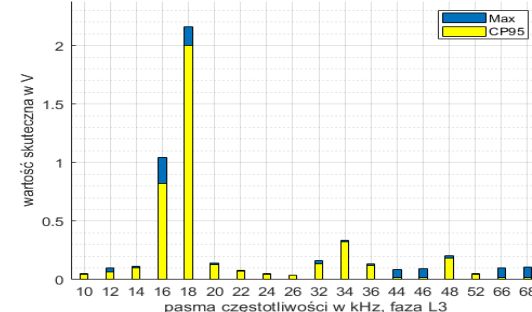
PQ-Box 300 obok wartości zagregowanych pozwala również na zapis wartości 200 ms minimalnej i maksymalnej, jaka została zarejestrowana w interwale agregacji. Potencjalnym źródłem zaburzeń przewodzonych w rozważanym paśmie częstotliwości są m.in. elektrownie fotowoltaiczne EPV. Długoterminowe pomiary i rejestracje wykonano w wybranych punktach sieci dystrybucyjnej. Rysunek 2 i 3 przedstawia wartości dominujących supraharmonicznych zarejestrowanych w punkcie przyłączenia dwóch EPV o mocach: 1,5 MWp (EPV-1) i 0,84 MWp (EPV-2). Pomiary i rejestracje wykonano na poziomie niskiego napięcia. Czas trwania rejestracji wynosił odpowiednio: 14 i 22 dni. Do obliczenia supraharmonicznych napięcia dla pasma 9-170 kHz analizator PQ-Box 300 stosuje 2 kHz przedziały częstotliwości oraz typowo agregację danych w 10-minutowych interwałach zgodnie z normą PN-EN 61000-4-30. Dla czytelności wykresów przedstawiono supraharmoniczne napięcia, których wartość skuteczna przekroczyła 40 mV.

Dominujące supraharmoniczne napięcia, EPV 1,5 MWp, >=0,04 V - 10-min



Rys.2. Dominujące supraharmoniczne napięcia instalacji fotowoltaicznej o mocy 1,5 MWp – rejestracja 14-dniowa

Dominujące supraharmoniczne napięcia, EPV 0,84 MWp, >=0,04 V - 10-min



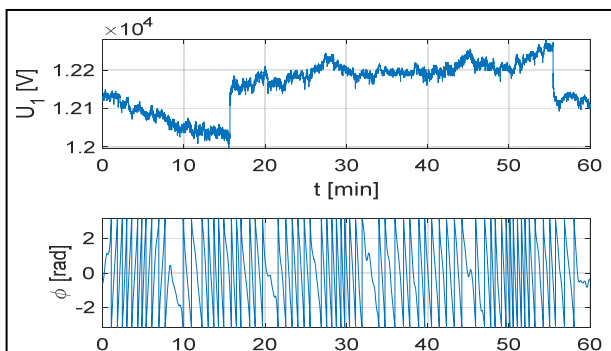
Rys.3. Dominujące supraharmoniczne napięcia instalacji fotowoltaicznej o mocy 0,84 MWp – rejestracja 21-dniowa

Na podstawie przedstawionych wyników analizy zarejestrowanych danych można stwierdzić, że w punkcie przyłączenia monitorowanych instalacji EPV wystąpiły następujące dominujące supraharmoniczne napięcia (cztery największe wartości, malejąco): EPV-1: 20, 40, 16 i 32 kHz; EPV2: 18, 16, 34 i 48 kHz. W przypadku EPV-1 największa wartość wynosi 0,45 V dla 20 kHz, a w przypadku EPV-2 wynosi 2,14 V dla 18 kHz. Warto zwrócić uwagę na różnicę między wartością maksymalną, a wartością percentyla CP95. W niektórych przypadkach jest znacząca.

Wykorzystanie synchronofazorów w sieci dystrybucyjnej

W typowych SCM sieci elektroenergetycznych wykorzystuje się nadrzędne sterowanie i systemy SCADA. Dane z tych systemów są dostępne po kilku sekundach. Fizyczne zmienne stanu, tj. napięcia zespolone lub przesunięcia fazowe pomiędzy punktami pomiarowymi, nie są w tych systemach obserwowane bezpośrednio. Istnieje

jednak możliwość estymacji tych wartości na podstawie modeli sieci. Takie rozwiązanie było wystarczająco dobre przez wiele lat. Niestety, złożoność systemów energetycznych ciągle wzrasta, co powoduje, że temu klasycznemu podejściu brakuje rozdzielczości czasowej i precyzji. Te niedoskonałości najwcześniej zostały zauważone przez operatorów sieci transmisyjnych. Głównym wyzwaniem w sieciach transmisyjnych było porównywanie wielu pomiarów wykonanych w odległych od siebie punktach pomiarowych. Systemy do pomiaru synchronizacji pozwoliły na takie pomiary zapewniając bardzo dokładną synchronizację pomiędzy punktami pomiarowymi. Pomiar fazora wykonywany jest za pomocą jednostek PMU zainstalowanych w sieci elektroenergetycznej. Fazor rejestrowany jest w czasie rzeczywistym oraz dokładnie zsynchronizowany z czasem absolutnym. OSD dotychczas mieli ograniczone możliwości monitorowania. Pojawienie się w sieci analizatorów jakości energii oraz liczników energii AML poszerzyło jednak obraz pracy sieci. Jednak w obu przypadkach informacja pochodząca z tych urządzeń jest to informacja zagregowana. Z powodu dynamicznego rozwoju RZE oraz spodziewanego pojawienia się w systemie dużych obciążeń w postaci pojazdów elektrycznych, tradycyjna sieć dystrybucyjna, w której przepływ energii odbywa się w jednym kierunku, nie jest już normą. W sposób naturalny nasuwa się więc rozwiązanie problemu monitorowania takiej rozproszonej sieci za pomocą monitorowania wielu punktów sieci dystrybucyjnej w sposób synchroniczny. W literaturze naukowej istnieje kilka propozycji zastosowania synchronizacji w sieci dystrybucyjnej. Są to np. detekcja zdarzeń i ich klasyfikacja [11], detekcja topologii [12], walidacja modeli [13] lub wykrywanie pracy wyspowej. W dobie rozproszonej sieci z dwukierunkowym przepływem energii sprawny system pomiarowy, zapewniający odpowiednią obserwowalność staje się wskazany, a czasami niezbędny. Przeprowadzono wstępne pomiary synchronizacji w systemie dystrybucyjnym. Do pomiaru wykorzystano jednostkę RZ-40 PMU z firmy Energotest. Rysunek 4 przedstawia godzinę rejestracji synchronizacji w jednym z GPZ w Enea Operator. Fazory obliczane były zgodnie ze standardem C37.118.1 i klasą pomiarową M. Próbkę zapisywane są z częstotliwością 50 Hz.



Rys.4. Rejestracja fazora (modułu U_1 oraz fazy ϕ) w sieci dystrybucyjnej

Podsumowanie

Przedstawiono koncepcję oraz podstawowe informacje dotyczące projektu realizowanego przez Enea Operator w ramach POIR prowadzonego przez NCBR. Podjęte działania dotyczą prac badawczo-rozwojowych w obszarze monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej oraz bilansowania mocy i energii. Obecnie realizacji podlega etap I projektu. Dotyczy pomiarów i rejestracji oraz analizy jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem supraharmonicznych napięcia w paśmie 9-150 kHz oraz z

wykorzystaniem techniki synchronizacji w sieciach dystrybucyjnych. W sieci dystrybucyjnej realizowane są pomiary i rejestracje z wykorzystaniem analizatorów PQ-Box 300 A.Eberle i synchronizatorów RZ-40 PMU Energotest. Zaprezentowano wybrane wyniki i analizy.

Prace prowadzone i finansowane są w ramach projektu pt. „System bilansowania mocy i energii oraz monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii” w ramach Działania 1.2: „Sektorowe programy B+R” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



Autorzy: dr inż. Andrzej Firlit, e-mail: afirlit@agh.edu.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, e-mail: hanzel@agh.edu.pl; dr inż. Krzysztof Piątek, e-mail: kpiatek@agh.edu.pl; dr inż. Szymon Barczentewicz, e-mail: barczent@agh.edu.pl; Krzysztof Chmielowiec, e-mail: kchmielo@agh.edu.pl; mgr inż. Mateusz Dutka, e-mail: mdutka@agh.edu.pl; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

LITERATURA

- [1] Hanzelka Z., Firlit A. i inni, *Elektrownie ze źródłami odnawialnymi – zagadnienia wybrane*, redakcja naukowa prof. Z. Hanzelka, dr inż. A. Firlit, *Wydawnictwa AGH*, ISBN 978-83-7464-817-2, (2016)
- [2] 5th Benchmarking Report on Quality of Electricity Supply, *CEER*, (2012), 6th edition in 2016/6.1-2018
- [3] Bollen M.H.J., Milanović J.V., Čukalevski N., *CIGRE/CIREC JWG C4.112 – Power Quality Monitoring, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba, Journal RE&PQ*, 12 (April 2014)
- [4] Kilter J., Meyer J. et al., Current practice and future challenges for power quality monitoring, *CIGRE WG C4.112, IEEE*, (2012)
- [5] Meyer J., Kilter J., Howe B., Zavoda F. et al., Contemporary and future aspects of cost effective power quality monitoring, *Position Paper of CIGRE WG C4.112, IEEE*, (2012)
- [6] CIGRE/CIREC Guidelines For Power Quality Monitoring – Measurement Locations, *Processing And Presentation of Data. Technical Brochure*, (2014)
- [7] I Krajowy raport benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych, *Urząd Regulacji Energetyki*, (2009)
- [8] Power quality and EMC issues with future electricity networks, *JWG C4.24/CIREC, CIGRE*, (2018)
- [9] Application of phasor measurement units for monitoring power system dynamic performance, *WG C4.34/CIGRE*, (2017)
- [10] Synchronphasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications, *A White Paper by the NASPI Distribution Task Team*, Editor: A. Meier - UC Berkeley, (2018)
- [11] Jamei M., Stewart E., Peisert S. et al., Micro Synchronphasor Based Intrusion Detection in Automated Distribution Systems: Toward Critical Infrastructure Security, *IEEE Internet Computing*, 20(5), (2016), 18-27
- [12] Cavarro G., Arghandeh R. et al., Distribution network topology detection with time-series measurements, *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), IEEE Power & Energy Society*, (2015), 1-5
- [13] Borkowski D., Wetula A., Bien A., New method for noninvasive measurement of utility harmonic impedance, *Power and Energy Society General Meeting, IEEE 2012*
- [14] Study report on EMI between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz – ed.3, *CENELEC*, (2015)
- [15] Rönnerberg S. K., Emission and interaction from domestic installations in the low voltage electricity network up to 150 kHz, PhD thesis, Luleå University of Technology, (2013)
- [16] Klatt M., Meyer J. et al., Frequency responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz, *ICHQP, 14th International Conference*, (2010), 1-6
- [17] Klatt M., Meyer J., Schegner P., Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz, *16th ICHQP, IEEE Bucharest, Romania*, (2014)