











Współczesne trendy i wyzwania w dziedzinie jakości dostawy energii elektrycznej – wybrane prace badawcze, eksperymentalno-rozwojowe oraz dydaktyczne Zespołu Jakości Energii Elektrycznej

Andrzej Firlit , Zbigniew Hanzelka , Krzysztof Piątek ,
Krzysztof Chmielowiec , Szymon Barcentewicz , Mateusz Dutka ,
Tomasz Siostrzonek , Ryszard Klempka ,
Chamberlin Stephane Azebaze Mboving , Waldemar Skomudek 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: W artykule podjęto próbę przedstawienia współczesnych trendów i wyzwań w obszarze jakości dostawy energii elektrycznej w kontekście rozwoju inteligentnych systemów elektroenergetycznych oraz energetyki rozproszonej. Tematyka ta jest bardzo szeroka i wieloaspektowa, szczególnie ze względu na transformację energetyczną, w której uczestniczymy. Autorzy artykułu, członkowie Zespołu Jakości Energii Elektrycznej AGH, brali udział w realizacji wielu prac naukowo-badawczych, eksperymentalno-rozwojowych, dydaktycznych w ramach krajowych i międzynarodowych projektów. Związane one były ze współpracą z energetyką zawodową (OSD, OSP), przemysłem oraz instytucjami działającymi na rzecz rynku energii. Przedstawiono skrótowo przykładowe, wybrane zagadnienia.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, energetyka rozproszona, inteligentne systemy elektroenergetyczne, systemy monitorowania, prognozowanie produkcji i zużycia energii

CONTEMPORARY TRENDS AND CHALLENGES
IN THE AREA OF POWER QUALITY –
SELECTED RESEARCH, DEVELOPMENT AND DIDACTIC WORKS OF
THE POWER QUALITY TEAM

Abstract: This article attempts to present contemporary trends and challenges in the area of power quality in the context of the development of intelligent power systems (smart grids) and distributed generation. These issues are very broad and multifaceted, especially due to the energy transformation we are participating in. The authors of the article, who are members of the Power Quality Team of AGH University, have participated in the implementation of many research, experimental, development, and education works as part of national and international projects. They were related to the cooperation with power companies and utilities (DSO, TSO), industry, and institutions operating for the energy market. Some selected issues are briefly presented.

Keywords: power quality, distributed generation, smart grids, monitoring systems, power production and consumption forecasting

1. Wprowadzenie

Transformacja energetyczna związana jest między innymi z rozwojem ekoenergetyki oraz tzw. inteligentnych systemów elektroenergetycznych (*smart grids*) (Hanzelka i Firlit 2015, energetyka-rozproszona.pl 2022b). Obszary te są ze sobą silnie powiązane. Ekoenergetyka jest pojęciem bardzo szerokim i wieloaspektowym. Oznacza m.in. opracowywanie i wdrażanie rozwiązań technicznych oraz technologicznych, które w możliwie największym stopniu są przyjazne środowisku naturalnemu, czyli są proekologiczne. W praktyce związane jest to z wykorzystaniem na szeroką skalę rozproszonych odnawialnych źródeł energii (OZE) do produkcji energii elektrycznej, w skali mini i makro, czyli od instalacji w gospodarstwach domowych do wielomegawatowych elektrowni. Produkcja energii elektrycznej z OZE jest bardzo istotnym obszarem ekoenergetyki, ale nie jedynym. Innowacyjne systemy elektroenergetyczne typu eko zawierają rozwiązania pozwalające na minimalizację zużycia oraz strat energii. Dzięki temu można zrationalizować zużycie energii elektrycznej oraz zwiększyć efektywność wytwarzania, przesyłania i przekształcania energii elektrycznej. Dotyczy to również wdrażania nowatorskich metod umożliwiających odzyskiwanie energii. Określenie „inteligentne systemy elektroenergetyczne” dotyczy systemów, w których zastosowano takie rozwiązania, jak:

- rozproszone źródła energii (RZE), ze szczególnym uwzględnieniem OZE;
- systemy pomiarowe przeznaczone do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci zasilających (*smart metering*), wykorzystujące inteligentne przyrządy pomiarowe (np. analizatory jakości energii elektrycznej, liczniki energii elektrycznej typu AMI – *advanced metering infrastructure*);
- systemy efektywnego przetwarzania oraz kondycjonowania energii elektrycznej bazujące na układach energoelektronicznych;
- systemy magazynowania energii elektrycznej wykorzystujące różne technologie;
- samochody elektryczne – związane jest to z transformacją przemysłu motoryzacyjnego w kierunku elektromobilności;
- narzędzia informatyczno-telekomunikacyjne do zastosowań w elektroenergetyce w zakresie sprzętu i oprogramowania;
- systemy prognozowania poziomów produkcji i zapotrzebowania energii elektrycznej (energii cieplnej, gazu, ...).

Zespół Jakości Energii Elektrycznej (Zespół JEE) będący częścią Katedry Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii aktywnie uczestniczy w działaniach na rzecz transformacji energetycznej. Realizowane prace wynikają z aktualnych trendów i wyzwań współczesnej elektrotechniki, elektroenergetyki i energoelek-

troniki. Dotyczą prawie wszystkich z wyżej wymienionych obszarów. Zespół JEE od wielu lat silnie współpracuje z energetyką zawodową (OSD, OSP), przemysłem oraz instytucjami związanymi z rynkami energii. W kolejnych rozdziałach przedstawiono skrótowo wybrane obszary aktywności Zespołu JEE, realizowane projekty krajowe i międzynarodowe, prace naukowo-badawcze i eksperymentalno-rozwojowe.

2. Energetyka rozproszona i klastry energii

Wypracowanie strategii rozwoju RZE w Polsce było celem projektu KlastER¹, finansowanego przez NCBR w latach 2019–2022 (KlastER 2023). Zespół JEE był odpowiedzialny za kompleksowe badania uwarunkowań i barier technicznych ograniczających rozwój RZE, w szczególności odnawialnych, opracowanie i pilotażowe wdrożenie rozwiązań dotyczących jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) (stabilizatory napięcia, kompensatory statyczne, energetyczne filtry aktywne, układy dynamicznych stabilizatorów napięcia, inteligentne interfejsy energoelektroniczne itp.), monitorowanie stanu technicznego sieci zasilających oraz lokalne bilansowanie energii (cykl seminariów oraz konferencje „Forum Energetyki Rozproszonej”). W ramach projektu między innymi:

- zorganizowano we współpracy z TAURON Dystrybucja SA tzw. Piknik OZE poświęcony kompleksowym badaniom interfejsów energoelektronicznych instalacji fotowoltaicznych (energetyka-rozproszona.pl 2021, 2022a);
- przeprowadzono badania rozwiązań technicznych służących poprawie warunków dostawy energii elektrycznej w sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, w tym magazynów energii elektrycznej (prace w toku) – we współpracy z TAURON Dystrybucja SA, Polskim Stowarzyszeniem Magazynowania Energii i Gminą Ochotnica Dolna (Gmina Ochotnica Dolna 2022).

Projekt zapewnia także możliwość wykorzystywania rezultatów prac i badań licznych instytucji działających w obszarze szeroko rozumianej energetyki rozproszonej. Osiągnięciu tego celu służy utworzona Sieć Kompetencji ds. Energetyki Rozproszonej jako profesjonalna instytucja badawcza zorientowana na doradztwo i analizy istotne dla wdrożenia polityki państwa w obszarze energetyki rozproszonej². W ramach projektu KlastER we współpracy z AGH zapoczątkowano wydawanie czasopisma „Energetyka Rozproszona”³.

¹ <https://www.er.agh.edu.pl/> [dostęp: 30.04.2022].

² <https://www.energetyka-rozproszona.pl/siec-kompetencji/> [dostęp: 30.04.2022]

³ <https://www.energetyka-rozproszona.pl/czasopismo/> [dostęp: 30.04.2022].

3. Systemy mikrosieci oraz elastyczne struktury produkcji i konsumpcji energii elektrycznej

Opracowanie, przetestowanie i ocena nowych rozwiązań zwiększających elastyczność w zakresie zapotrzebowania na energię w małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP) było celem projektu „Renewable Energy and Load Flexibility in Industry” (RELflex) finansowanego przez NCBR w ramach programu ERA-Net⁴. Przeprowadzono szczegółową analizę uwarunkowań rynkowych potencjału rozwoju DSM/DSR w Polsce opartego na agregacji rezerwowych źródeł zasilania wraz z przedstawieniem mechanizmów DSM/DSR możliwych do zastosowania w infrastrukturze przedsiębiorstw, uwzględniając specyfikę i charakterystykę rynku energii elektrycznej w Polsce. Opracowano i zbudowano infrastrukturę elektroenergetyczną agregatora składającą się z mikrosieci utworzonej w laboratorium Zespołu JEE (rys. 1), gdzie znajduje się też centrum sterowania agregatora za pomocą opracowanej aplikacji. Mikrosieć składa się z zestawu z generatorem synchronicznym, baterijnego magazynu energii, instalacji fotowoltaicznej z falownikiem hybrydowym i własnym magazynem energii, pompy ciepła oraz sterowalnych odbiorników. W instytucjach partnerskich projektu zainstalowano rezerwowe generatory prądowórcze oraz interfejsy do zdalnego ich włączania i wyłączenia. Całość systemu, składająca się z mikrosieci w laboratorium Zespołu JEE i generatorów rezerwowych z interfejsami kontrolno-pomiarowymi, tworzy też wirtualną elektrownię (*virtual power plant – VPP*).

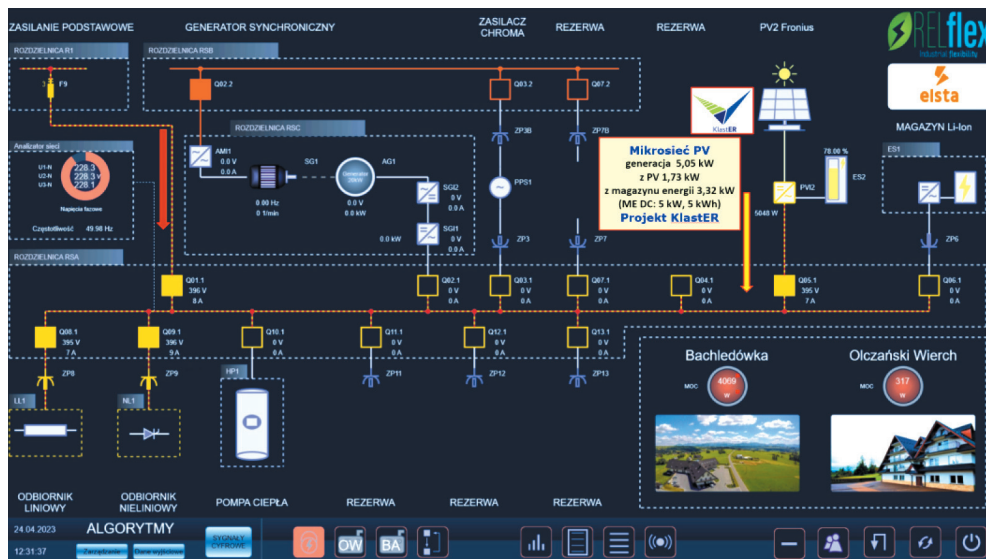


Rys. 1. Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej – stanowisko mikrosieci

Na rysunku 2 przedstawiono ekran główny aplikacji (panel operatora) pełniący rolę agregatora danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w miejscu przyłączenia generatorów rezerwowych i OZE. W projekcie opracowano również dynamiczny model

⁴ <http://relflex.eu/> [dostęp: 30.04.2022].

oddziaływania na sieć elektroenergetyczną systemu bilansowania mocy i energii – tej generowanej przez źródła energii i magazyny oraz pobieranej przez odbiorniki występujące u partnerów projektu. Opracowano scenariusze i algorytmy użycia rezerwowych agregatów prądowców w przypadku zarówno pracy autonomicznej agregatów (na wyspę), jak i pracy synchronicznej. Określono korzyści wynikające z wdrożenia operacyjnego rozwiązania polegającego na wykorzystywaniu energii produkowanej w agregacie rezerwowym do obniżenia kosztów energii u partnerów.



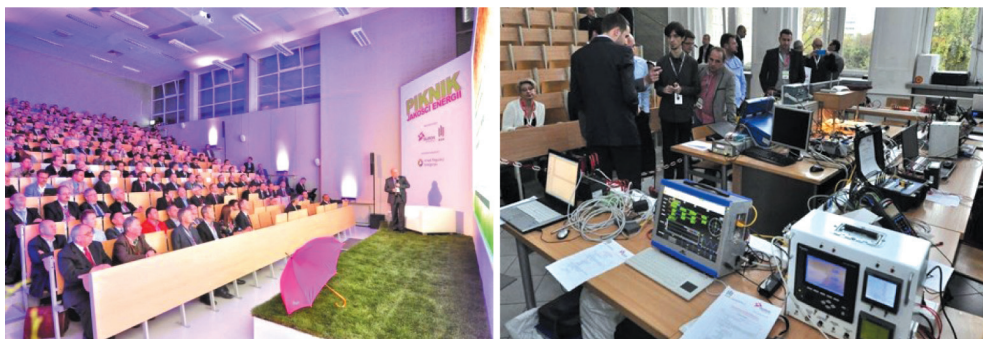
Rys. 2. Ekran główny aplikacji do zarządzania mikrosiecią w laboratorium Zespołu JEE

4. Badania porównawcze analizatorów jakości energii elektrycznej, liczników energii elektrycznej i przekształtników fotowoltaicznych

4.1. Badania porównawcze analizatorów jakości energii elektrycznej – Piknik JEE

Aktualnym zagadnieniem z zakresu analizy i oceny JDEE jest przygotowanie procedur weryfikacji poprawności pomiarów wykonywanych za pomocą specjalistycznych mierników. Kwestia ta wydaje się pozornie oczywista, gdyż od ponad dwóch dekad korzysta się z analizatorów JEE, a ich zastosowanie w pomiarach gwałtownie rośnie w ciągu ostatnich lat. Jednak pomiary wskaźników JDEE za pomocą różnych mierników (analizatorów, liczników, rejestratorów i innych), podłączonych do tego samego punktu, czasami dają rozbieżne wyniki, których niepewność przekracza limity ustanowione w odpowiednich normach. W Zespole JEE prowadzone są badania dotyczące

metod weryfikacji poprawności pomiarów oraz algorytmów pomiarowych stosowanych w analizatorach JEE (Chmielowiec i in. 2012, Hanzelka i in. 2013). Szczególnym podsumowaniem tych prac była organizacja we współpracy z TAURON Dystrybucja SA pierwszej konferencji „Piknik Jakości Energii Elektrycznej” (23.10.2014), pod patronatem Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (rys. 3). Celem wydarzenia była promocja problematyki JDEE oraz wymiana doświadczeń w gronie ekspertów wywodzących się z różnych środowisk: operatorów systemów dystrybucyjnych i przesyłowych, odbiorców oraz producentów przyrządów pomiarowych. Przeprowadzony został eksperyment pomiarowy polegający na badaniach porównawczych analizatorów. Do udziału zaproszeni zostali obecni na polskim rynku producenci oraz dystrybutorzy aparatury pomiarowej, którzy mają w swojej ofercie analizatory spełniające wymagania klasy A.



Rys. 3. „Piknik Jakości Energii Elektrycznej” – część seminaryjna i część eksperymentalna

Organizatorom udało się zgromadzić i poddać badaniom 14 analizatorów JEE. Wykonane testy i analizy pozwalają na stwierdzenie, że w przypadku kombinacji różnych zaburzeń nie wszystkie wyniki zawierały się w przedziale dopuszczalnej niepewności pomiarowej. W kilku przypadkach analizatory nie dokonały pomiaru wymaganego wskaźnika lub otrzymane wyniki były niezgodne z wartościami oczekiwanymi. Przeprowadzony eksperyment pozwolił na uzyskanie wielu cennych informacji na temat wiarygodności pomiarów oraz wiedzy dotyczącej testowania analizatorów JEE. Pełny raport zawierający opis oraz wyniki eksperymentu pomiarowego (Chmielowiec i in. 2015) został udostępniony na stronie internetowej wydarzenia⁵.

4.2. Badania porównawcze liczników energii elektrycznej – Piknik AMI

Opracowanie i budowa systemu pomiarowego typu AMI jest dużym przedsięwzięciem zarówno z technicznego, ekonomicznego, społecznego, jak i badawczego punktu

⁵ <https://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-jee> [dostęp: 30.04.2022].

widzenia. Docelowa liczba mierników liczonych w milionach sztuk, rozległy obszar, na którym będą instalowane, zapewnienie transmisji danych i zdalnego zarządzania oraz wymóg ciągłej pracy jednoznacznie świadczą o skali przedsięwzięcia. Budowa systemu AMI umożliwia kompleksową przebudowę i udoskonalenie całego procesu rozliczeniowego energii elektrycznej. Jednak spośród wielu aspektów związanych z budową systemu pomiarowego typu AMI jedną z podstawowych kwestii jest poprawność pomiaru energii czynnej i biernej realizowana przez liczniki do celów rozliczeniowych. Szczególnie jest to istotne, gdy warunki pracy sieci elektroenergetycznych odbiegają od idealnych, czyli w warunkach pogorszonych wskaźników JDEE. Problematyka ta jest silnie związana z teorią mocy, a stan wiedzy w tym obszarze uległ istotnym zmianom w ostatnich trzech dekadach (Firlit 2008). Bardzo dobry odbiór Pikniku JEE przyczynił się do przeprowadzenia jego drugiej edycji, która zorganizowana została przez Akademię Górniczo-Hutniczą, TAURON Dystrybucja SA i Politechnikę Wrocławską. Konferencja odbyła się 19 listopada 2015 roku w AGH pod nazwą „Piknik AMI”, a jej tematyka dotyczyła liczników energii elektrycznej typu smart meter oraz systemów pomiarowych AMI (rys. 4). Głównym celem Pikniku AMI było przeprowadzenie eksperymentalnych badań porównawczych liczników. Badaniom poddano 17 liczników zgłoszonych przez siedmiu producentów. Testy zaprojektowano w taki sposób, aby dokonać oceny poprawności pomiaru energii czynnej i biernej dla różnych odbiorników oraz różnych stanów napięcia zasilającego, z uwzględnieniem obecności zaburzeń JDEE. Drugi etap Pikniku AMI zrealizowany został w Politechnice Wrocławskiej. Jego celem było przeprowadzenie badań porównawczych liczników w zakresie skuteczności komunikacji i transmisji danych pomiarowych z wykorzystaniem elektroenergetycznej sieci rozdzielczej (PLC). Szczegółowe informacje dotyczące Pikniku AMI dostępne są na stronie internetowej wydarzenia (Firlit i in. 2016)⁶.



Rys. 4. Piknik AMI – część seminaryjna i część eksperymentalna

⁶ <https://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-ami> [dostęp: 30.04.2022].

4.3. Badania porównawcze przekształtników fotowoltaicznych – Piknik OZE

W 2021 roku przygotowano i przeprowadzono eksperyment badawczy polegający na porównaniu pracy prosumenckich przekształtników (falowników) fotowoltaicznych (1-fazowych oraz 3-fazowych) w warunkach laboratoryjnej wydzielonej sieci zasilającej – „Piknik Odnawialnych Źródeł Energii – Badania porównawcze falowników fotowoltaicznych dla instalacji prosumenckich” (Piknik OZE 2021). Wydarzenie zorganizowane zostało przez Akademię Górniczo-Hutniczą reprezentowaną przez Zespół JEE, TAURON Dystrybucja SA oraz uczelnie współpracujące ze Spółką w ramach Rady Naukowej: Politechnikę Wrocławską, Politechnikę Śląską, Politechnikę Opolską i Politechnikę Częstochowską. Głównym miejscem realizacji eksperymentów było laboratorium Zespołu JEE w Centrum Energetyki AGH. W ramach badań przeprowadzono testy ponad 30 falowników fotowoltaicznych różnych typów w zakresie:

- efektywności energetycznej (sprawności elektrycznej) falowników PV, w tym skuteczności śledzenia punktu pracy o maksymalnej mocy (MPPT),
- warunków technicznych regulujących współpracę mikroinstalacji z elektroenergetyczną siecią dystrybucyjną z uwzględnieniem wymagań kodeksu sieciowego NC RfG, Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej IRiESD oraz stosownych norm,
- wybranych zagadnień z obszaru kompatybilności elektromagnetycznej EMC.

Uzyskane wyniki dostarczyły wielu cennych informacji zarówno dla producentów badanych falowników, jak i prosumentów oraz operatorów systemów dystrybucyjnych. Szczegółowe informacje dostępne są na stronie serwisu energetyka-rozproszona.pl (2021, 2022a).

5. Rozproszone systemy ciągłego monitorowania wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej oraz systemy integracji, analizy i oceny danych pomiarowych

W Zespole JEE prowadzone są od wielu lat prace w dziedzinie rozproszonych, pomiarowych systemów monitorowania wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej (RSM W-JDEE) (Firlit 2012, Świątek i in. 2015). Systemy te budowane są w celu długoterminowego gromadzenia danych pozwalających na analizę i ocenę JDEE w monitorowanym systemie elektroenergetycznym. Celem podejmowanych prac było opracowanie narzędzi informatycznych (oprogramowania) pozwalających na gromadzenie i integrację odpowiednich danych elektrycznych oraz nieelektrycznych, ich przetwarzanie oraz realizację różnych analiz i ocen względem przyjętych kryteriów. Uzyskane informa-

cje mogą być użyteczne do np.: poprawy JDEE, zwiększenia efektywności i wydajności pracy sieci elektroenergetycznych, lokalizacji źródeł zaburzeń elektroenergetycznych czy obliczania syntetycznych (zagregowanych, obszarowych) wskaźników (np. związanych z JEE).

RSM może zawierać różne systemy produkcyjne i środowiska bazodanowe przeznaczone do obsługi części analizatorów, liczników lub innych urządzeń pomiarowych danego producenta. W przypadku sieci typu *smart grid* (OZE, RZE, mikrosieci) oprócz danych elektrycznych pojawiają się dodatkowe strumienie danych innego typu, na przykład historyczne, bieżące i prognozowane dane pogodowe, dane z systemów SCADA, dane z układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ). W monografii Hanzelki i Firlita (2015) w rozdziale 4 opisano szczegółowo zagadnienia związane z RSM W-JDEE. Poszczególne systemy pomiarowe, analizatory, rejestratory i mierniki różnią się. Rozbieżności dotyczą m.in. liczby rejestrowanych parametrów, sposobu rejestracji zdarzeń, formy zapisu danych (relacyjna baza danych, własne formaty zapisu, formaty: COMTRADE, PQDIF, NeQual, standardowe pliki: csv, txt, xls/xlsx), metody dostępu do danych, postaci i zawartości generowanych raportów oraz zestawu oferowanych narzędzi do wizualizacji i analizy danych. Budowa systemu monitorowania jest procesem złożonym i wieloetapowym. Znaczącym wyzwaniem jest opracowanie koncepcji i założeń odpowiednich dla użytkownika systemu, szczególnie zważywszy na perspektywę wieloletniego użytkowania systemu. W wyniku przeprowadzonych prac zbudowano pilotażową aplikację przeznaczoną do konwersji i normalizacji oraz integracji i analizy danych pomiarowych pochodzących z różnych systemów monitorowania, przyrządów pomiarowych, analizatorów oraz środowisk bazodanowych. Opracowano i zaaplikowano też autorskie algorytmy grupowania wskaźników JEE, które są rekomendowane przez Urząd Regulacji Energetyki (Hanzelka i in. 2011, 2015).

Lista zdefiniowanych zagregowanych wskaźników to:

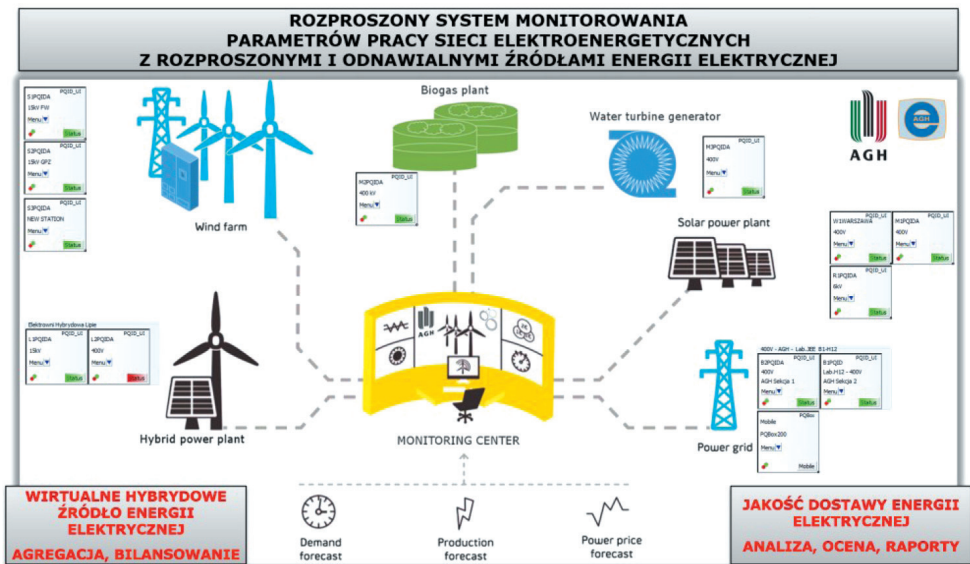
- W1 – wskaźnik wolnych zmian napięcia U , bazuje na wartości skutecznej napięcia;
- W2 – wskaźnik odkształcenia napięcia, bazuje na współczynniku THD_U napięcia;
- W3 – wskaźnik asymetrii napięcia, bazuje na współczynniku asymetrii napięcia K_{2U} ;
- W4 – wskaźnik wahań napięcia, bazuje na współczynniku długookresowego migania światła P_{It} , który jest miarą fluktuacji (wahań) napięcia zasilającego.

Wskaźniki W1, W2, W3, W4 obliczane są co tydzień na podstawie zarejestrowanych danych pomiarowych.

5.1. Wirtualna hybrydowa elektrownia

W ramach projektu NCBR pt. „Badania nad opracowaniem wytycznych, techniki i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu

wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne” (WindLipie) (Hanzelka i Firlit 2015, Firlit i in. 2015) został zaprojektowany i zbudowany rozproszony system ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych. System ten stanowi również przykład wirtualnego, hybrydowego źródła energii elektrycznej (wirtualnej elektrowni – VPP). Do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystywana jest energia wiatru, słońca, wody oraz biogaz będący ubocznym produktem oczyszczania ścieków. Zatem do produkcji energii elektrycznej wykorzystywane są turbiny wiatrowe, panele fotowoltaiczne oraz dwa generatory synchroniczne współpracujące z turbiną wodną i silnikiem biogazowym. System obejmuje siedem źródeł energii. Poszczególne jednostki wytwórcze znajdują się w różnych regionach kraju. W punktach przyłączenia obiektów do systemu elektroenergetycznego zainstalowane zostały analizatory JEE klasy A. Na rysunku 5 przedstawiono panel operatorski opracowanego RSM W-JDEE oraz wirtualnej hybrydowej elektrowni.

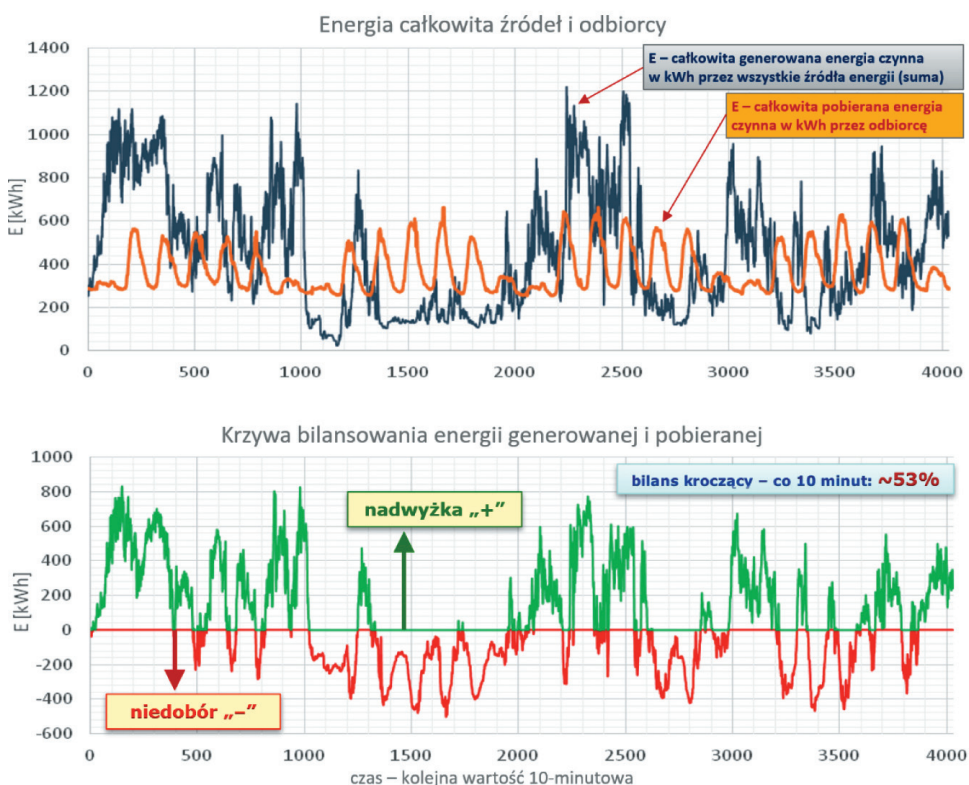


Rys. 5. Panel operatorski opracowanego i zbudowanego RSM W-JDEE z RZE i OZE – wirtualna hybrydowa elektrownia

Źródło: opracowanie własne na podstawie Firlit i in. (2015), Hanzelka i Firlit (2015)

Przykładowe wykresy wartości całkowitej energii czynnej pobieranej przez dużego instytucjonalnego odbiorcę (Kampus AGH), energii czynnej generowanej przez wirtualną hybrydową elektrownię oraz przebieg krzywej (charakterystyki) bilansowania przedstawiono na rysunku 6 – dla wybranego miesiąca. Kolorem zielonym oznaczono nadwyżki produkcji, a kolorem czerwonym – jej niedobory.

Wirtualna elektrownia generowała energię przez 100% czasu podlegającego analizie. Na podstawie pomiarów obliczono, że skumulowane zapotrzebowanie Kampusu AGH na energię czynną w badanym okresie wyniosło 1510 MWh. W tym samym czasie wirtualna hybrydowa elektrownia wygenerowała 1808 MWh energii elektrycznej. Na tej podstawie można stwierdzić, że w bilansie energii wirtualnego źródła i odbiorcy wartość skumulowana nadwyżki energii wynosi 298 MWh. Natomiast porównując produkcję i zużycie energii w kolejnych następujących po sobie 10-minutowych przedziałach czasu, wyznaczono, że przez 53% analizowanego okresu zapotrzebowanie na energię elektryczną jest zaspokajane. Zakres prac i badań prowadzonych w ramach projektu był zdecydowanie szerszy, rozważano m.in.: kompensację mocy biernej turbin wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych z wykorzystaniem kompensatorów statycznych, różne metody lokalizacji źródeł zaburzeń elektromagnetycznych oraz ewaluacji indywidualnej emisji źródeł i odbiorników, a także metody prognozowania wielkości produkcji energii w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych (Hanzelka i in. 2011, 2015, Świątek i in. 2015).



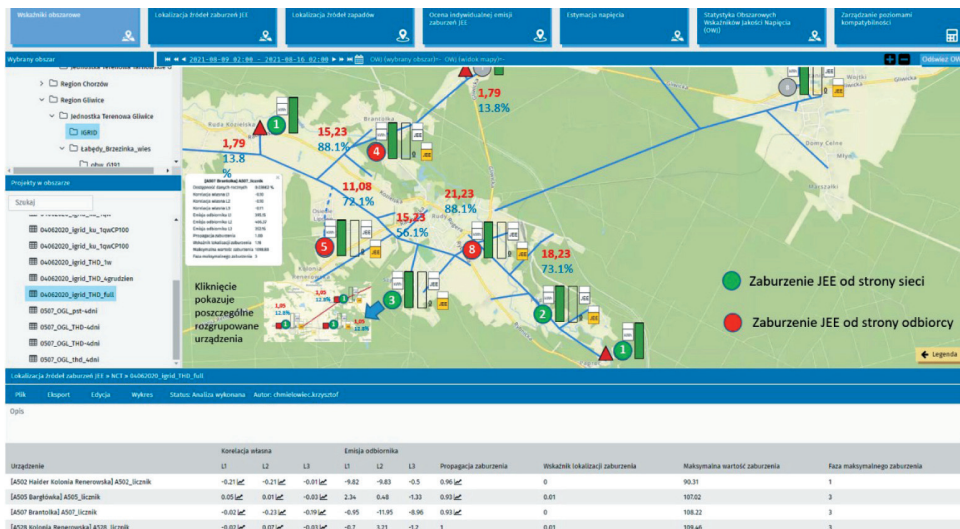
Rys. 6. Charakterystyka (krzywa) bilansowania energii czynnej pobieranej przez dużego instytucjonalnego odbiorcę z energią czynną generowaną przez wirtualną elektrownię
Źródło: opracowanie własne na podstawie Firlit i in. (2015), Hanzelka i Firlit (2015)

5.2. Systemy nadrzędne – integracja i analiza danych pomiarowych

We współpracy z PSE SA zrealizowano projekt pt. „Opracowanie i wykonanie programu komputerowego do oceny jakości dostawy energii elektrycznej, który na podstawie tradycyjnych wskaźników jakości napięcia będzie wypracowywał zagregowany indeks oraz formuły naliczania kar i bonifikat, uwzględniające udział przyłączonych podmiotów w emisji zakłóceń” (SOJEE). W ramach prac został opracowany, wykonany i wdrożony pilotażowy system SOJEE do oceny i rozliczeń JEE. Stanowi „nakładkę” na wykorzystywany system pomiarowy ciągłego monitorowania przeznaczony do współpracy z zainstalowanymi w PSE analizatorami JEE. Aplikacja realizuje m.in. następujące funkcje:

- odczyt i wizualizację danych źródłowych z punktów pomiarowych sieci elektroenergetycznej PSE;
- obliczanie i wizualizację wskaźników całkowitych i cząstkowych dla każdego punktu pomiarowego w różnych okresach obliczeniowych (tygodniowym, dobowym, tygodniowo-kroczącym, miesięcznym) z uwzględnianiem lub nieuwzględnianiem odczytów flagowanych oraz z kontrolą przekroczeń współczynnika $\text{tg}(\varphi)$ – w każdym z tych przypadków można wygenerować raport;
- obliczanie i wizualizację zagregowanych wskaźników W1–W4 umożliwiających porównanie jakości napięcia na wybranych obszarach (dla grup punktów pomiarowych);
- rozliczanie odbiorców i dostawcy oraz kontrolę poprawy JEE na podstawie analizy ścieżki poprawy;
- lokalizację dominującego źródła wahań napięcia oraz dominującego źródła wyższych harmonicznych, a także analizę indywidualnej emisji sprawcy przekroczenia poziomów granicznych zaburzeń opartą na metodach statystycznych przy wykorzystaniu próbek 10-minutowych wartości skutecznej prądu, napięcia, mocy czynnej i biernej, współczynnika P_{st} oraz harmonicznych napięcia i prądu;
- konfigurowanie aplikacji polegające na dodawaniu nowych punktów pomiarowych, definiowaniu i przypisywaniu do punktów szablonów zawierających właściwe miary statystyczne (percentyle) i wartości graniczne parametrów biorących udział w obliczeniach, a także deklarowaniu grup punktów pomiarowych i obszarów, dla których wyznaczany jest obszarowy współczynnik JEE oraz ścieżka poprawy.

Na rysunku 7 pokazano przykładowe okno aplikacji SOJEE z wybraną analizą danych.



Rys. 8. Przykładowe okno aplikacji środowiska SOPJEE

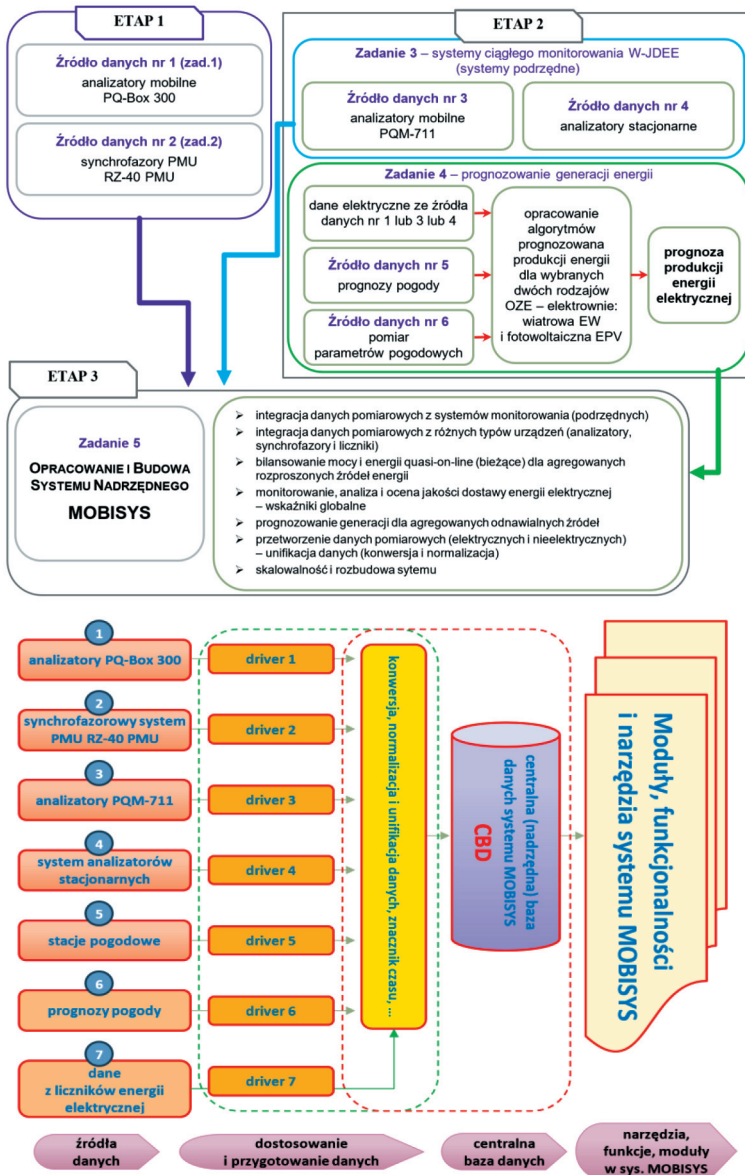
Źródło: materiały Procom System

Kolejnym przykładem RSM W-JDEE jest system opracowany w ramach projektu NCBR pt. „System bilansowania i monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii” (MOBISYS), we współpracy z Enea Operator (Firlit i in. 2020b). W ramach tego projektu wykonane zostały prace badawczo-rozwojowe oraz eksperymentalne dotyczące:

- analizy JDEE z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz (analiza supraharmonicznych);
- wykorzystania techniki synchronfazorowej w monitorowaniu i analizie JDEE na potrzeby sieci dystrybucyjnych – zastosowanie układów PMU (*phasor measurement unit*);
- opracowania koncepcji i funkcjonalności RSM W-JDEE oraz ciągłego bilansowania mocy i energii wprowadzanej do systemu elektroenergetycznego OSD przez wybrane RZE oraz magazyny energii elektrycznej;
- opracowania systemu prognozowania generacji energii dla OZE: elektrowni wiatrowej i elektrowni fotowoltaicznej;
- opracowania i budowy demonstratora nadrzędnego systemu informatycznego przeznaczonego do integracji i przetwarzania danych pomiarowych oraz do bilansowania mocy i energii wybranych RZE oraz magazynów energii elektrycznej.

Końcowym rezultatem projektu jest opracowanie nadrzędnego systemu informatycznego MOBISYS. Jego podstawowym zadaniem jest integracja danych (elektrycznych i nieelektrycznych) z mobilnych i stacjonarnych analizatorów, synchronfazorów, stacji pogo-

dowych oraz z instytucji przekazujących prognozy wybranych parametrów pogodowych. Zaimplementowane zostaną również moduły i funkcjonalności zawierające narzędzia związane z wyżej wymienionymi obszarami. Na rysunku 9 przedstawiono graficznie koncepcję, założenia i organizację źródeł danych w ramach systemu MOBISYS.



Rys. 9. Koncepcja, założenia i organizacja źródeł danych systemu MOBISYS – bilansowania mocy i energii oraz monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i magazynów energii

6. Kondycjonery energii elektrycznej – poprawa wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej

Z koncepcją *smart grids* silnie związane jest również stosowanie układów energoelektronicznych do poprawy pracy sieci elektroenergetycznych. Dąży się też do wzmocnienia pozycji odbiorcy energii i częściowego przekształcania go z biernego konsumenta w prosumenta, czyli wytwórcę energii. Lokalne wytwarzanie energii i jej zużywanie (elektroprosumeryzm⁷) pozwala między innymi: zmniejszyć straty przesyłowe, uniezależnić odbiorców od dostaw energii ze źródeł konwencjonalnych, zmienić profil energetyczny konsumentów oraz ograniczyć emisję CO₂. W latach 2014–2016 Zespół JEE realizował międzynarodowy projekt KIC ProInterface w ramach KIC InnoEnergy⁸. Celem projektu było opracowanie koncepcji funkcjonalnej, wykonanie projektu technicznego, budowa, badania i wdrożenie rodziny energoelektronicznych interfejsów sieciowych integrujących instalacje prosumentów z elektroenergetyczną siecią dystrybucyjną niskiego napięcia. Zespół JEE w ramach KIC ProInterface opracował prototypy rodziny urządzeń energoelektronicznych o mocy od 15 kVA do 50 kVA: równoległego energetycznego filtra aktywnego APF (*active power filter*) i szeregowego energetycznego stabilizatora napięcia DVR (*dynamic voltage restorer*). Zgodnie z założeniem projektu APF i DVR w swoich pełnych, wdrożeniowych wersjach przeznaczone były m.in. do zastosowania przez OSD w celu poprawy JDEE na styku z prosumentem.

Wdrożenie i komercjalizacja przeprowadzona została przez firmę ELSTA Elektronika. Podczas Targów ENERGETAB 2016 ELSTA Elektronika wystawiła pierwszą wdrożeniową wersję APF. Za produkt ten otrzymała prestiżowe wyróżnienie, jakim jest statuetka „Lwa” Fundacji im. Kazimierza Szpotańskiego. Nagroda ta przyznawana jest za wyrób wysokiej jakości elektrotechnicznej produkcji polskiej fabryki (rys. 10).

Opracowanie urządzeń takich jak APF i DVR wymaga rozwiązania wielu problemów technicznych. Jedną z nich jest opracowanie, testowanie i realizacja układu sterowania. W ramach podjętych prac na etapie badań i testów wykorzystano układy rodziny Zynq firmy Xilinx. Określane są przez producenta mianem Extensible Processing Platform. W pojedynczym układzie scalonym umieszczono dwurdzeniowy procesor ARM oraz matrycę rekonfigurowaną FPGA. Do opracowania algorytmów sterowania wykorzystano pakiet MATLAB/Simulink, który umożliwia automatyczną generację kodu. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano możliwość pracy w trybie szybkiego prototypowania, co ułatwia działania implementacyjne (Piątek i Kołek 2015). Wybrane wyniki prac zamieszczono w publikacjach (Firlit i in. 2017, Kołek i in. 2017, Kołek i Firlit 2021).

⁷ <https://ppte2050.pl/> [dostęp: 30.04.2022].

⁸ <http://www.innoenergy.com/> [dostęp: 30.04.2022].



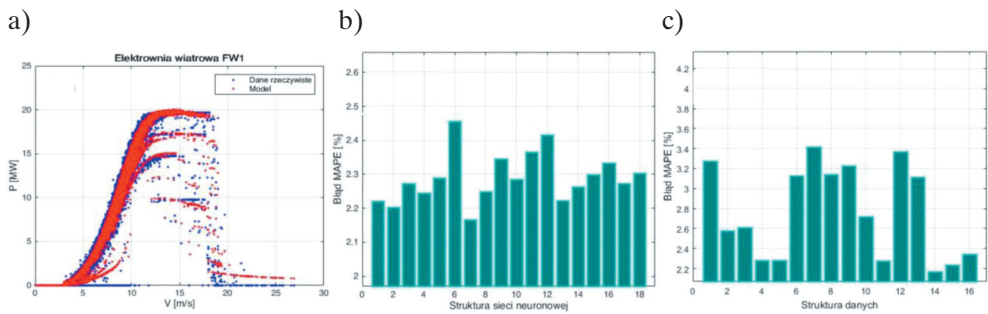
Rys. 10. Zdjęcie modelu fizycznego równoległego energetycznego filtra aktywnego oraz dyplomu i statuetki „Lwa” Fundacji im. Kazimierza Szpotkańskiego – Targi ENERGETAB 2016
Źródło: materiały Elsta Elektronika, www.elsta.tech

7. Prognozowanie produkcji i zużycia energii elektrycznej

Obserwowany dynamiczny rozwój, a także wzrost liczby i sumarycznej mocy instalacji OZE oraz RZE przyłączanych do sieci zasilających stwarza nowe wyzwania związane z zarządzaniem systemem elektroenergetycznym. Generacja mocy i energii z OZE uzależniona jest silnie od zmiennych czynników pogodowych. W szczególności dotyczy to elektrowni fotowoltaicznych i elektrowni wiatrowych. Warto zwrócić uwagę na trendy związane z dążeniem do zwiększenia elastyczności energetycznej oraz usługami elastyczności. W tym kontekście rośnie zainteresowanie aplikacjami do prognozowania produkcji energii z OZE, jak również prognozowania zużycia energii elektrycznej przez odbiorców. Z wyżej wymienionych powodów w Zespole JEE podjęto prace

naukowo-badawcze oraz implementacyjne w zakresie prognozowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. W pierwszej kolejności opracowano i wdrożono system prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną oraz gaz ziemny w ArcelorMittal Poland SA, który z sukcesem stosowany jest już od wielu lat. Prowadzone były również aktywne działania dotyczące OZE. Pozyskano kompetencje i doświadczenie związane z prognozowaniem generacji energii elektrycznej przez elektrownie fotowoltaiczne i elektrownie wiatrowe. Zarówno w ujęciu punktowym, jak i obszarowym, także w odniesieniu do wirtualnych elektrowni. Prace te realizowano m.in. we wcześniej wymienionych projektach, np. WindLipie, MOBISYS.

W Zespole JEE opracowana została autorska aplikacja będąca demonstratorem systemu prognozowania. Wyposażona została m.in. w moduł budowania przez użytkownika modeli prognostycznych właściwych dla konkretnego przypadku oraz w moduł przetwarzania danych w celu ich właściwego przygotowania. Szersza analiza działania zaproponowanych modeli została opisana w pracy doktorskiej Dutki (2020). Przedstawia szczegółowo problematykę budowy modeli prognostycznych dla OZE. Wykonana analiza wpływu czynników pogodowych na moc elektrowni wiatrowych oraz fotowoltaicznych pozwala wytypować strukturę danych wejściowych oraz zwiększyć dokładność prognoz. Zaproponowane modele sieci neuronowych oraz algorytmy uczenia maszynowego umożliwiają wykonanie prognoz o wysokiej trafności, porównywalnej lub niejednokrotnie lepszej niż w przypadku modeli komercyjnych (rys. 11).

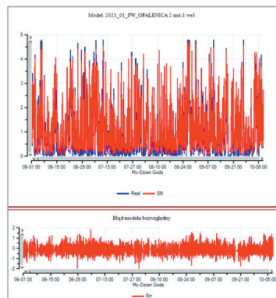


Rys. 11. Elektrownia wiatrowa: zmierzone oraz prognozowane charakterystyki mocy w zależności od prędkości wiatru, dla której błąd MAPE był najniższy (a), oraz zestawienie dokładności prognoz MAPE ze względu na strukturę sieci neuronowej (b) i strukturę danych wejściowych (c)

Źródło: Dutka (2020)

Na rysunkach 12 i 13 pokazano przykładowe okna z opracowanego demonstratora systemu prognozowania produkcji energii: dla elektrowni wiatrowej EW (rys. 12), dla elektrowni fotowoltaicznej EPV (rys. 13a) oraz dla wirtualnej elektrowni złożonej z EW i EPV (rys. 13b).

a)

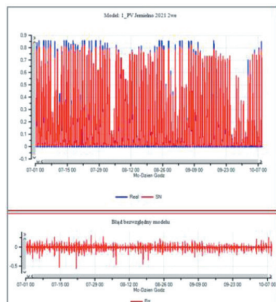


b)

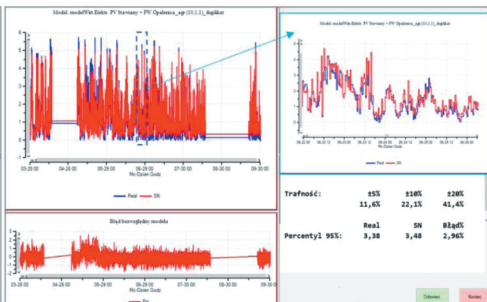


Rys. 12. Przykładowe okno aplikacji do prognozowania: a) elektrownia wiatrowa: model $\text{moc} = f(\text{prędkość wiatru, liczba pracujących turbin, temperatura})$; b) model uczony na podstawie zdyskretyzowanego zbioru uczącego

a)



b)



Rys. 13. Przykładowe okno aplikacji do prognozowania: a) elektrownia fotowoltaiczna: model $\text{moc} = f(\text{nasłonecznienie, temperatura})$; b) wirtualna elektrownia EPV+EW: model $\text{moc VPP} = f(\text{EPV}_{(\text{nasłonecznienie})}, \text{EW}_{(\text{prędkość wiatru, liczba turbin})})$

8. Współpraca z energetyką zawodową, przemysłem i edukacją

Zespół JEE od prawie trzydziestu lat współpracuje z energetyką zawodową, przemysłem oraz instytucjami działającymi w obszarze energetyki. Podejmowane prace dotyczą wielu obszarów współczesnej elektrotechniki, a szczególnie: jakości dostawy energii elektrycznej, inteligentnych systemów elektroenergetycznych *smart grids*, energetyki rozproszonej, magazynów energii, kondycjonerów jakości energii, UPS-ów, a także usług elastyczności i efektywności energetycznej. Zgromadzony specjalistyczny sprzęt pomiarowy pozwala na prowadzenie pomiarów i rejestracji (od mikrosekund do wielu miesięcy) w warunkach rzeczywistych oraz laboratoryjnych bardzo obszernego zbioru parametrów (wskaźniki JDEE) opisujących pracę sieci elektroenergetycznych oraz przyłączonych do niej urządzeń. Zespół JEE dysponuje ponad dwudziestoma mobilnymi i stacjonarnymi analizatorami JEE klasy A oraz rozbudowanym wyposażeniem

uzupełniającym. Wykonanych zostało wiele różnego rodzaju prac, których przedstawienie przekracza zakres artykułu (Baggini i in. 2021). Przykładowe wymieniono poniżej:

- Długoterminowe pomiary i rejestracje analizatorami JEE prowadzone równoległe w kilku punktach w CELSA Huta Ostrowiec w celu analizy pracy sieci elektroenergetycznej 110 kV i 30 kV przed modernizacją i po jej przeprowadzeniu. Modernizacja polegała m.in. na instalacji układu statycznego kompensatora FC/TCR o mocy 160 Mvar (projekt NCBR w ramach programu INNOSTAL). Celem pracy układu FC/TCR jest kompensacja mocy biernej oraz redukcja negatywnego oddziaływania pieca łukowego 115 MVA na sieć OSD 110 kV i OSP 400 kV. Praca pieca łukowego skutkowała znaczącym (nadmiernym) wzrostem wahań napięcia w punkcie przyłączenia do 110 kV. Zaburzenie to jest propagowane na poziom 400 kV. Instalacja układu FC/TCR przyczyniła się do istotnej redukcji generowanych wahań napięcia (redukcja współczynników P_{st} i P_{lt}).
- Analiza pracy sieci elektroenergetycznej PGE Dystrybucja przed uruchomieniem i po uruchomieniu magazynu energii elektrycznej – 2,1 MW, 4,2 MWh – przyłączonego do GPZ 15 kV. W 2020 roku wykonano długoterminowe pomiary i rejestracje analizatorami JEE prowadzone równoległe w dziesięciu punktach, a w roku 2021 w dwunastu punktach na poziomie SN i nN. Szczególną uwagę poświęcono analizie poziomów W-JDEE oraz analizie pracy magazynu energii m.in. w trakcie testów pracy wyspowej.
- Analiza pracy sieci elektroenergetycznych zakładów górniczych zawierająca analizę i ocenę JDEE, analizę gospodarki mocą bierną w obecności wyższych harmonicznych napięć i prądów wraz z rekomendacją możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych.

Zaangażowanie się w Centrum Energetyki AGH pozwoliło na stworzenie Zespołu Laboratoriów JEE, m.in. we współpracy z TAURON Dystrybucja SA. Powiększone zostały też zasoby specjalistycznej aparatury. W laboratoriach prowadzone są badania i testy kompatybilności elektromagnetycznej odbiorników, układów energoelektronicznych oraz źródeł energii w zakresie odporności na zaburzenia i emisji zaburzeń. Prowadzone są również aktywne prace w zakresie badań metrologicznych, które m.in. dotyczą:

- kompleksowych testów analizatorów JEE klasy A pod kątem badania zgodności z wymaganiami norm: PN-EN 61000-4-30, PN-EN 61000-4-15, PN-EN 61000-4-7, IEC 62586-1, IEC 62586-2;
- testów liczników energii elektrycznej, szczególnie z zaimplementowanymi algorytmami obliczania wskaźników JDEE oraz algorytmami obliczania zagregowanych wskaźników W1–W4 zgodnie z rekomendacjami URE (ich koncepcja została opracowana w Zespole JEE) – wskaźniki te wykorzystywane są przez OSD, jako syntetyczne, obszarowe miary JDEE w sieciach elektroenergetycznych;

- testów różnego typu przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w obszarze JDEE;
- badania i testów pracy urządzeń w warunkach zaburzonych przebiegów napięć i prądów;
- merytorycznego wsparcia w implementacji algorytmów obliczania wskaźników JDEE.

Kompetencje i doświadczenie uzyskane podczas licznych prac związanych z pomiarami oraz wysokiej klasy sprzęt pomiarowy są wykorzystywane w Laboratorium Wzorcowania Mierników do Pomiaru Wskaźników Jakości Dostawy Energii Elektrycznej. Laboratorium to uzyskało 11.04.2022 akredytację Polskiego Centrum Akredytacji w Warszawie⁹.

Rozwój energetyki rozproszonej, inteligentnych systemów elektroenergetycznych i klastrów energii wymaga upowszechniania wiedzy i budowy systemu edukacji na wszystkich jego poziomach – od podstawowego, niezbędnego do pozyskania społecznej akceptacji dla tej formy zaspokajania potrzeb energetycznych, po wysokospecjalistyczny, ekspercki, gwarantujący poprawność techniczną i ekonomiczną podejmowanych decyzji. Do tej kategorii działań można zaliczyć następujące aktywności Zespołu JEE:

- oferta studiów podyplomowych, na przykład „Jakość energii elektrycznej”¹⁰ (przeprowadzono 13 edycji, w tym dwie zrealizowano dla kadry inżynierskiej KGHM Polska Miedź i Enea Operator), „Rozproszone źródła i magazyny energii – klastry energii”¹¹;
- szkolenia prowadzone m.in. dla kadry inżynierskiej TAURON Dystrybucja SA, Urzędu Dozoru Technicznego oraz w ramach Stowarzyszenia Elektryków Polskich SEP;
- współorganizowanie konferencji tematycznych, na przykład „Electrical Power Quality and Utilisation – EPQU 2020”, Forum Energetyki Rozproszonej, konferencja branżowa „Jakość Energii Elektrycznej” we współpracy z firmą ASTAT.

9. Podsumowanie

Podejmowane przez Zespół Jakości Energii Elektrycznej AGH prace i działania bezpośrednio związane są z transformacją energetyczną, w której uczestniczy Polska,

⁹ <https://www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-wzorcujace/AP%20205,podmiot.html> [dostęp: 30.04.2022].

¹⁰ <http://www.jee.agh.edu.pl/> [dostęp: 30.04.2022].

¹¹ <http://www.rze.agh.edu.pl/> [dostęp: 30.04.2022].

Europa i świat. Ich realizacja była możliwa dzięki zaangażowaniu się w krajowe i międzynarodowe projekty oraz aktywnej współpracy z energetyką zawodową i przemysłem oraz instytucjami związanymi z rynkiem energii. Ma to bardzo pozytywny wpływ na rozwój Zespołu JEE w szczególności, a generalnie na rozwój pracowników uczelni. Daje możliwość dzielenia się wiedzą i kompetencjami charakterystycznymi dla środowiska akademickiego, ale też jest źródłem cennego doświadczenia. Stanowi wyzwanie związane z weryfikacją prowadzonej działalności naukowo-badawczej w praktyce, w rzeczywistości pozauczelnianej. Pozyskana praktyczna wiedza, zakupiona specjalistyczna aparatura oraz zbudowane stanowiska laboratoryjne wykorzystywane są w procesie kształcenia studentów oraz aktywności publikacyjnej.

Literatura

- Baggini A., Hanzelka Z. (ed.), Firlit A., Moskwa S., Rodziewicz T., 2021, *Handbook of electrical power reliability: selected issues*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Chmielowiec K., Firlit A., Ziętek M., Piątek K., Szkoda R., Balawender P., 2012, *Comparative tests of power quality analyzers – harmonic distortion*, [w:] *ICHQP 2012: 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Hong Kong, 17–20 June 2012*, IEEE, Piscataway, s. 307–312. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381286>.
- Chmielowiec K., Rogóż M., Hanzelka Z., Bień A., Firlit A., Kołek K., Piątek K., Woźny K., 2015, *Piknik jakości energii elektrycznej: raport z eksperymentu pomiarowego – badania porównawcze analizatorów JEE*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, TAURON Dystrybucja S.A. Biuro Innowacji i Nowych Technologii, Kraków, <https://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-jee> [dostęp: 30.04.2022].
- Chmielowiec K., Wiczyński G., Rodziewicz T., Firlit A., Dutka M., Piątek K., 2020, *Location of power quality disturbances sources using aggregated data from energy meters*, [w:] *EPQU'20: 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilization: 14th–15th September, 2020, Kraków, Poland: conference proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EPQU50182.2020.9220293>.
- Dutka M., 2020, *Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków [rozprawa doktorska].
- energetyka-rozproszona.pl, 2021, *Seminarium 14. Piknik Odnawialnych Źródeł Energii. Eksperymentalne badania porównawcze falowników PV*, 16.06.2021, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/piknik-odnawialnych-zrodel-energii/> [dostęp: 30.04.2022].

- energetyka-rozproszona.pl, 2022a, [Raport] „Piknik Odnawialnych Źródeł Energii. Badania porównawcze falowników fotowoltaicznych dla instalacji prosumenckich, 9.12.2022, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/artykuly/raport-piknik-odnawialnych-zrodel-energii-badania-porownawcze-falownikow-fotowoltaicznych-dla-instalacji-prosumenckich/> [dostęp: 9.12.2022].
- energetyka-rozproszona.pl, 2022b, „Wizje Nowej Energetyki” – wykłady czołowych ekspertów w obliczu kryzysu energetycznego, 16.08.2022, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/wizje-nowej-energetyki/> [dostęp: 10.11.2022].
- Firlit A., 2008, *Annex 3: Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms*, [w:] Baggin A. (ed.), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, Chichester, s. 27–51, <https://www.wiley.com/legacy/wileychi/powerquality/supp/annex3.pdf> [dostęp: 30.04.2022].
- Firlit A., 2012, *Ciągły monitoring jakości energii elektrycznej*, *Wiadomości Elektrotechniczne*, R. 80, nr 2, s. 6–9.
- Firlit A., Hanzelka Z., Chmielowiec K., Piątek K., Świątek B., Woźny K., 2015, *Opracowanie wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z rozproszonych i odnawialnych źródeł z zastosowaniem systemu ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce: VI konferencja: Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r.*, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań, s. 105–119.
- Firlit A. i in., 2016, *Badania porównawcze inteligentnych liczników energii elektrycznej – Piknik AMI*, <https://www.tauron-dystrybucja.pl/-/media/offer-documents/dystrybucja/inne-dokumenty/piknik-ami/piknik-ami-raport.ashx>, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Politechnika Wroclawska, TAURON Dystrybucja, Kraków – Wrocław [dostęp: 30.04.2022].
- Firlit A., Kołek K., Piątek K., 2017, *Heterogeneous active power filter controller*, [w:] Muštra M., Vitas D., Zovko-Cihlar B. (eds.), *Proceedings of Elmar-2017: 59th International Symposium: 18–20 September 2017, Zadar, Croatia*, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, s. 241–244. <https://doi.org/10.23919/ELMAR.2017.8124477>.
- Firlit A., Świątek B., Hanzelka Z., Piątek K., Dutka M., Siostrzonek T., 2020a, *Analysis of selected power quality indicators at non-measured distribution network points based on measurements at other points*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 96, nr 5, s. 39–42. <https://doi.org/10.15199/48.2020.05.07>.
- Firlit A., Hanzelka Z., Piątek K., Barcentewicz S., Chmielowiec K., Dutka M., 2020b, *Monitorowanie jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem supraharmonicznych oraz synchronofazorów*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 96, nr 3, s. 59–62. <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.15>.

- Gmina Ochotnica Dolna, 2022, *Przemysłowe magazyn energii elektrycznej w Ochotnicy: Gmina Ochotnica Dolna*, <http://www.ochotnica.pl/aktualnosci/przemyslowe-magazyn-energii-elektrycznej-w-ochotnicy/> [dostęp: 30.04.2022].
- Hanzelka Z., Firlit A. (red.), 2015, *Elektrownie ze źródłami odnawialnymi: zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Hanzelka Z., Firlit A., Błajszczak G., 2011, *Syntetyczne miary jakości napięcia*, [w:] Kwiatkowski Z.R. (red.), *Automatyka, elektryka, zakłócenia*, INFOTECH, Gdańsk, s. 118–126.
- Hanzelka Z., Chmielowiec K., Firlit A., Świątek B., 2013, *New challenges for voltage quality studies*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 6, s. 17–25.
- Hanzelka Z., Firlit A., Jurek J., Rączka J., Świątek B., 2015, *Zagregowane wskaźniki w rozproszonym systemie oceny jakości dostaw energii elektrycznej PSE SA*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce: VI konferencja: Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r.*, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań, s. 43–54.
- KlastER, 2023, *Strategia rozwoju energetyki rozproszonej w Polsce do 2040 roku*, 13.01.2023, <https://www.er.agh.edu.pl/aktualnosci/strategia-rozwoju-energetyki-rozproszonej-w-polsce-do-2040-roku/> [dostęp: 13.01.2023].
- Kołek K., Firlit A., 2021, *A new optimal current controller for a three-phase shunt active power filter based on Karush–Kuhn–Tucker conditions*, *Energies*, vol. 14, iss. 19, 6381, s. 1–17. <https://doi.org/10.3390/en14196381>.
- Kołek K., Firlit A., Piątek K., 2017, *Rapid controller development for a Dynamic Voltage Restorer*, [w:] Muštra M., Vitas D., Zovko-Cihlar B. (eds.), *Proceedings of Elmar-2017: 59th International Symposium: 18–20 September 2017, Zadar, Croatia*, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, s. 237–240. <https://doi.org/10.23919/ELMAR.2017.8124476>.
- Piątek K., Kołek K., 2015, *Rapid algorithm prototyping and implementation for power quality measurement*, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, iss. 1, 19, s. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13634-015-0192-3>.
- Piątek K., Firlit A., Chmielowiec K., Dutka M., Barcentewicz S., Hanzelka Z., 2021, *Optimal selection of metering points for power quality measurements in distribution system*, *Energies*, vol. 14, iss. 4, 1202, s. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en14041202>.
- Świątek B., Firlit A., Hanzelka Z., Chmielowiec K., Piątek K., Woźny K., 2015, *Integracja analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej pochodzących od różnych producentów*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce: VI konferencja: Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r.*, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań, s. 193–202.