



Jakość energii

Opracowanie wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z RZE i OZE z zastosowaniem systemu ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej

dr inż. Andrzej Firlit
prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka
mgr inż. Krzysztof Chmielowiec
dr inż. Krzysztof Piątek
dr inż. Bogusław Świątek
mgr inż. Krzysztof Woźny

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Streszczenie

Niniejsza praca powstała w ramach projektu pt. „Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013, Priorytet 1 – Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Poddziałanie 1.3.1 – Projekty Rozwojowe.

Z koncepcją smart grids silnie związane jest wykorzystanie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii, wdrażanie na szeroką skalę systemów pomiarowych typu smart metering, stosowanie narzędzi informatyczno-telekomunikacyjnych oraz technologii energoelektronicznych. Przyczynia się to do zmiany sposobu pracy systemu elektroenergetycznego oraz otwiera nowe możliwości dla szerokokroczącego rynku elektroenergetycznego. W referacie przedstawiono wybrane prace wykonane w ramach realizacji projektu POIG wspartego finansowo przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. „Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne”. W ramach realizacji projektu podjęto różnego rodzaju działania m.in. zbudowano wirtualne, hybrydowe źródło energii elektrycznej złożone z rozproszonych i odnawialnych źródeł energii. Do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystywana jest energia wiatru, wody, promieniowania słonecznego oraz biogaz, będący ubocznym produktem oczyszczania ścieków. Zatem produkcja realizowana jest z wykorzystaniem turbin wiatrowych, turbiny wodnej, paneli fotowoltaicznych oraz zespołu silnik biogazowy – generator synchroniczny. Poszczególne jednostki wytwórcze zlokalizowane są na terenie całego kraju. W punktach przyłączenia obiektów do systemu elektroenergetycznego zainstalowane zostały analizatory jakości energii elektrycznej klasy A. Integrację całego systemu zrealizowano z wykorzystaniem systemu pomiarowego dedykowanego do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych, w tym wskaźników pozwalających na analizę i ocenę jakości energii elektrycznej. W referacie przedstawiono strukturę całego systemu wirtualnego, hybrydowego źródła energii oraz charakterystykę pracy wykorzystywanych instalacji wytwórczych. Zaprezentowano również wirtualny bilans energetyczny z uwzględnieniem energii konsumowanej przez dużego odbiorcę instytucjonalnego.

Wprowadzenie

W ostatniej dekadzie miał miejsce intensywny rozwój przyrządów do pomiaru parametrów jakości energii elektrycznej oraz dynamiczny rozwój środków technicznych dedykowanych do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych (SEE). Rozwój ten wymuszony został technicznymi i ekonomicznymi potrzebami pojawiającymi się po stronie energetyki zawodowej i przemysłu, po stronie instytucji regulujących rynki energetyczne oraz zachodzącymi procesami (zmianami) rynkowymi, gospodarczymi i czynnikami biznesowymi. Coraz częściej pojawia się konieczność analizy i oceny efektywności pracy oraz jakości energii dla już pracujących, a także dla planowanych do zakupienia i wdrożenia, systemów oraz urządzeń elektroenergetycznych.

Należy zwrócić również uwagę na obserwowany bardzo intensywny rozwój koncepcji smart grids, czyli „inteligentnych” systemów elektroenergetycznych. Jest to spowodowane potrzebą wprowadzenia nowej jakości do sieci elektroenergetycznych w obliczu pojawiających się zagrożeń zarówno w zakresie deficytu pierwotnych zasobów energii jak i zbyt niskiej efektywności jej wytwarzania, przesyłu, rozdziału i użytkowania. Jest to istotny czynnik przyczyniający się do wzrostu zainteresowania „inteligentnymi” systemami pomiarowymi, dedykowanymi do ciągłego monitorowania. Procesowi monitorowania podlegać mogą parametry dotyczące zużycia i produkcji energii elektrycznej (energy smart metering), efektywności energetycznej (energy efficiency smart metering) oraz jakości energii elektrycznej (power quality smart metering). Dzięki tego typu systemom uzyskuje się rozszerzenie funkcjonalności usług świadczonych przez dostawcę na rzecz odbiorcy, dają podstawę do działań w obszarze poprawy efektywności energetycznej. Odbiorcom oferują możliwość uczestnictwa w grze rynkowej oraz możliwość kontrolowanej indywidualnej generacji i magazynowania energii. Zdolność interakcji umożliwia bardziej precyzyjne zawieranie kontraktów na dostawę energii, lepiej dostosowanych do wymagań i potrzeb wszystkich stron [3]. Realizacja koncepcji smart grids związana jest z wdrażaniem, i to na szeroką skalę, technologii, które oferują nowe sposoby

produkcji, przetwarzania oraz konsumpcji energii elektrycznej. Skutkuje to zmianą sposobu pracy systemu elektroenergetycznego. W znaczącej części będą to rozwiązania innowacyjne i zaawansowane technicznie, oprócz systemów pomiarowych smart metering, należą do nich m.in.: narzędzia informatyczno-telekomunikacyjne ICT (ang. information and communication technologies), technologie (układy) energoelektroniczne, rozproszone źródła energii, ze szczególnym uwzględnieniem odnawialnych, technologie magazynowania energii, pojazdy elektryczne. Celem smart grid jest zrównoważenie produkcji i konsumpcji energii elektrycznej na wszystkich poziomach napięć, począwszy od producenta, a kończąc na ostatecznym odbiorcy [7].

Z koncepcją smart grids silnie związane jest wykorzystanie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii (RZE, OZE) oraz tworzenie sieci typu microgrid. Przyłączanie coraz większej liczby RZE i OZE zmienia warunki pracy systemu elektroenergetycznego i wiąże się z występowaniem zjawisk, które mogą pogarszać jakość dostawy energii elektrycznej do odbiorców. Aczkolwiek źródła te mogą jednocześnie stanowić potencjalne środki do kompensacji zaburzeń elektromagnetycznych i poprawy bezpieczeństwa energetycznego. Charakterystyczną właściwością OZE jest zmienny, bo zależny np. od warunków atmosferycznych, poziom generacji energii elektrycznej. Z tego powodu mogą mieć wpływ na zmiany napięcia w systemie zasilającym, tym silniejszy im większy mają udział w sumarycznej generacji. Sieć typu microgrid (inaczej mini-, mikro-sieć) oznacza ogólnie zbiór powiązanych ze sobą obiektów, takich jak: źródła energii, odbiorniki oraz zasobniki energii, przyłączonych zasadniczo do sieci głównej, lecz zdolnych także do samodzielnej pracy wyspowej. Tego typu sieci mogą mieć zastosowanie dla sieci gmin wiejskich, małych miast, budynków samowystarczalnych energetycznie itp. [7][8]. W mikrosieciach wszystkie urządzenia wchodzące w ich skład muszą być połączone ze sobą liniami komunikacyjnymi. Dzięki temu można realizować funkcje sterowania, nadawać priorytety źródłom, wymuszać stany pracy itp. Przez to możliwe jest regulowanie całego systemu według zadanych funkcji celu, np. minimalizacji kosztu wytworzenia energii. W urządzeniach wytwórczych i magazynach energii za realizację zadań sterowania odpowiadają układy energoelektroniczne. Zagadnienia kompatybilności i jakości energii elektrycznej w mikrosieciach są bardzo istotne. Ich spełnienie w wielu przypadkach jest warunkiem poprawnej ich pracy. Stąd wyposażenie sieci typu microgrids w systemy monitorowania odpowiedniego zbioru parametrów jest niezbędne.

Wdrażanie koncepcji „inteligentnych” sieci elektroenergetycznych smart grids skutkuje również zwiększeniem efektywności energetyki rozproszonej (popytowo-podażowej). Istotą tej technologii jest m.in. przeniesienie akcentu w skali społecznej z wytwarzania energii na zarządzanie energią, zwłaszcza w dziedzinach użytkowania energii elektrycznej oraz jej transportu [14]. Otwiera to możliwość tworzenia tzw. wirtualnych źródeł energii elektrycznej (WZE, ang. virtual power plant, VPP). W przypadku źródeł różnego typu otrzymujemy wirtualne hybrydowe (poligeneracyjne) źródło energii elektrycznej. Tego typu źródła można budować fizycznie, ale dzięki rozwojowi systemów pomiarowych mogą być tworzone wirtualnie, za pomocą odpowiednich narzędzi softwareowych. W konsekwencji może prowadzić to do wirtualnego bilansowania z uwzględnieniem urządzeń rozproszonej generacji [16].

Wirtualne hybrydowe źródło energii elektrycznej

Koncepcja

W ramach realizacji projektu POIG finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. „Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne” (Rys.1) podjęto różnego rodzaju prace i działania oraz analizy, badania i testy. Zaprojektowany i zbudowany został m.in. rozproszony system ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych oraz wskaźników jakości energii elektrycznej w punktach przyłączenia rozproszonych i odnawialnych źródeł energii. Do budowy systemu monitorowania zastosowane zostały analizatory jakości energii elektrycznej klasy A. Zatem umożliwia pełną analizę i ocenę jakości energii elektrycznej zarówno w zakresie zmian trendów parametrów „jakościowych”, jak i w obszarze zdarzeń. System ten stanowi również przykład wirtualnego, hybrydowego źródła energii elektrycznej. Do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystywana jest energia wiatru, wody, promieniowania słonecznego oraz biogaz, będący ubocznym produktem oczyszczania ścieków. Zatem produkcja realizowana jest z wykorzystaniem turbin wiatrowych, turbiny wodnej, paneli fotowoltaicznych oraz zespołu spalinowy silnik

biogazowy – generator synchroniczny. Poszczególne jednostki wytwórcze zlokalizowane są na terenie całego kraju.



Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne

Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013

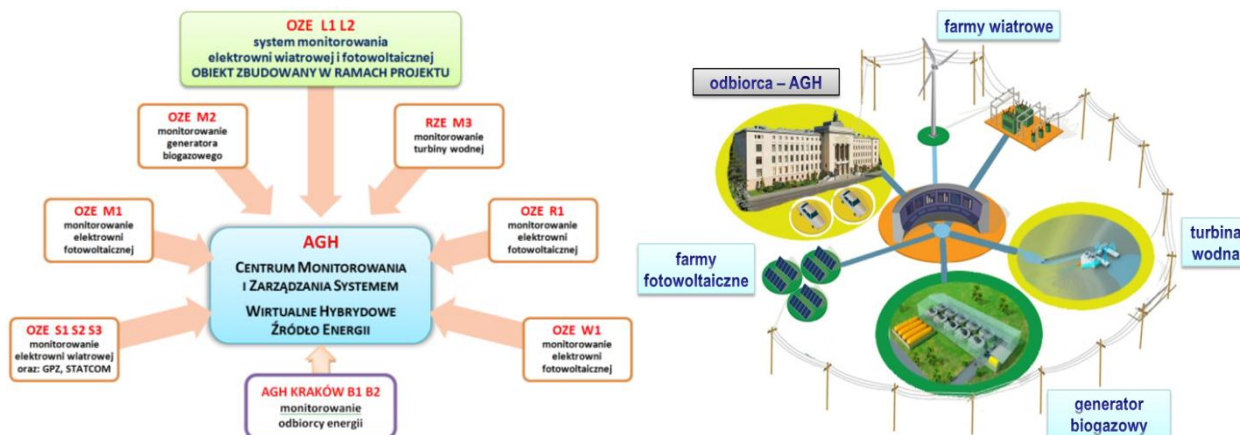
Priorytet 1 - Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Poddziałanie 1.3.1 - Projekty Rozwojowe

Rys.1. Tablica informacyjna projektu POIG finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

W tradycyjnym systemie elektroenergetycznym zakłada się przepływ energii w jednym kierunku mianowicie od dużych jednostek wytwórczych (elektrownie) poprzez sieci przesyłowe (wysokich napięć) do sieci rozdzielczych o coraz mniejszym napięciu (wysokie, średnie i niskie napięcie) do odbiorcy końcowego. Jednak jednokierunkowy przepływ energii od wytwórcy do odbiorcy, czyli jeden z filarów elektroenergetyki funkcjonujący od czasów Edisona, zaczął odchodzić w przeszłość. Nawet powstanie systemów elektroenergetycznych w postaci połączonych wielooczkowych układów sieciowych nie zachwiało jednokierunkowym przepływem energii, a wręcz wzmocniło go [12]. Wraz z powstawaniem sieci elektroenergetycznych powstawały duże centra wytwórcze energii elektrycznej nazywane obecnie wytwarzaniem wielkoskalowym (w odniesieniu do całej energetyki – wielkoskalowej energetyki korporacyjnej WEK [13]). Dopiero pojawienie się wytwarzania energii elektrycznej w odnawialnych źródłach energii, lokalizowanych coraz głębiej w sieci, oraz dążenie do wzmocnienia pozycji odbiorcy energii i częściowe przekształcanie go w wytwórcę (prosumenta) zachwiały jednokierunkowym przepływem energii. Zmierzenie się z tymi problemami wymaga nowego spojrzenia na elektroenergetykę, a głównie wyposażenia systemu elektroenergetycznego w „inteligencję”, czyli tworzenia sieci typu smart grids. Natomiast upodmiotowienie odbiorców, podjęcie przez nich roli prosumentów aktywnie uczestniczących w bilansowaniu generacji i zapotrzebowania w systemie elektroenergetycznym wymagało stworzenia warunków do obserwowalności i sterowalności urządzeń odbiorczych i wytwórczych, zainstalowanych u odbiorców i prosumentów. Dostarczenie na bieżąco informacji o każdym odbiorcy do centrów dyspozycyjnych i jednocześnie umożliwienie dotarcia z informacjami rynkowymi do odbiorców oraz sygnałami regulacyjnymi do prosumentów zrodziło konieczność tworzenia „inteligentnych” systemów pomiarowych typu smart metering.

Obecnie, nowoczesny system elektroenergetyczny zawiera liczne rozproszone, odnawialne źródła energii (RZE, OZE), najczęściej o stosunkowo niedużych mocach, które powinny być zbilansowane przez lokalne zapotrzebowanie na energię elektryczną. Niekontrolowany wzrost udziału generacji rozproszonej ma negatywny wpływ na prace sieci, ponieważ brak kontroli przesyłu mocy z sieci niskiego napięcia do sieci dystrybucyjnych i przesyłowych może doprowadzić do zaburzenia parametrów technicznych pracy sieci zasilających. W dalszej części przedstawiona zostanie struktura systemu monitorowania, a tym samym wirtualnego, hybrydowego źródła energii oraz charakterystyka pracy wykorzystywanych instalacji wytwórczych. Zaprezentowany zostanie również wirtualny bilans energetyczny dla energii pozyskiwanej z rozproszonych i odnawialnych źródeł energii z uwzględnieniem energii konsumowanej przez dużego odbiorcę instytucjonalnego, jakim jest Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Badania przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe mierzone i rejestrowane przez rozproszony system ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej.

Konceptję zbudowanego systemu monitorowania oraz układu rozproszonej generacji, w ramach którego przeprowadzono wirtualne bilansowanie wirtualnej hybrydowej elektrowni przedstawiono na rysunku Rys.2.



Rys.2. Poglądowy schemat koncepcji systemu monitorowania oraz układu rozproszonej generacji.

Na rysunku Rys.3 przedstawiono mapę Polski z zaznaczeniem lokalizacji źródeł energii oraz odbiorcy, a tym samym punktów pomiarowych.



Rys.3. Mapa Polski z zaznaczeniem lokalizacji źródeł energii i odbiorcy.

W tabeli Tabela 1 zamieszczono informacje dotyczące sumarycznych mocy zainstalowanych w poszczególnych rodzajach źródeł, całkowitą moc zainstalowaną oraz informacje dotyczące odbiorcy.

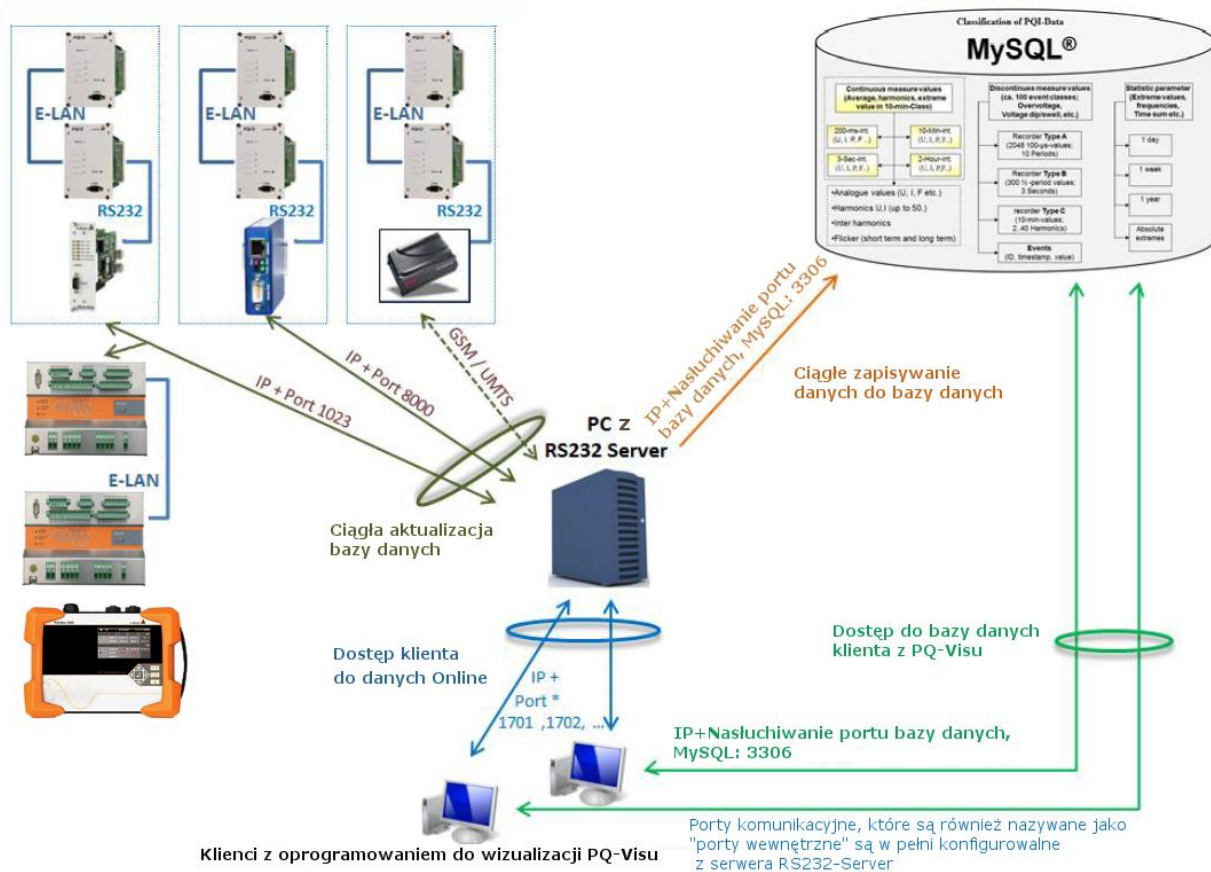
Tabela 1. Zestawienie mocy źródeł i odbiorcy oraz mocy sumarycznych.

	farmy wiatrowe	farmy fotowoltaiczne	generator biogazowy	turbina wodna
	moc instalacji			
	S1: 6,0/7,5 MWp	M1: 60 kWp	M2: 800 kWp	M3: 440 kWp
	L1: 1000 kWp	R1: 311 kWp		
		L2: 7 kWp		
		W1: 100 kWp		
suma mocy zainstalowanych wg rodzaju źródła	8500/7000 kWp	478 kWp	800 kWp	440 kWp
suma mocy zainstalowanych w źródłach	8718/10218 kWp			
odbiorca zapotrzebowanie na moc	4200 kVA			
odbiorca sumaryczna moc umowna	6000 kVA			

Sumaryczna moc farmy wiatrowej w lokalizacji S1 wynosi 7,5 MWp. Jednak ze względu na lokalne uwarunkowania oraz umowę z OSD maksymalny poziom generacji został ograniczony do 6,0 MWp. Turbina wodna M3 wykorzystywana jest do dławienia strumienia wody. Zatem poziom produkcji energii uzależniony jest od sterowania procesem dostawy wody.

System monitorowania jakości energii elektrycznej

Do budowy systemu monitorowania jakości energii elektrycznej w punktach przyłączenia źródeł energii zastosowano środowisko WinPQ oraz analizatory PQI-DA firmy AEberle. W niniejszym podrozdziale, ze względu na ograniczony rozmiar artykułu, przedstawiono tylko bardzo podstawowe informacje dotyczące systemu monitorowania oraz analizatora. Środowisko WinPQ jest rozbudowaną, kilkupoziomową platformą softwareową złożoną z wielu aplikacji i procesów. System monitorowania bazujący na środowisku WinPQ jest zgodny z wymaganiami współczesnego systemu pomiarowego typu smart metering, dedykowanego do monitorowania paramentów pracy sieci elektroenergetycznych oraz jakości energii elektrycznej. Analizatory współpracujące ze środowiskiem WinPQ posiadają certyfikat zgodności z klasą A wg normy PN EN 61000-4-30. Oferowane są w kilku wersjach. Wersje dedykowane do stacjonarnego montażu: PQI-DA, PQI-D, PQI-DA-smart oraz wersje mobilne: PQ-Box 200 i PQ-Box 100. W zależności od wykupionej licencji oprogramowanie WinPQ może być wykorzystane do zarządzania teoretycznie nieograniczoną liczbą analizatorów. Funkcję bazy danych pełni środowisko MySQL. System oraz analizatory mogą wykorzystywać różne media komunikacyjne do transmisji danych. Poszczególne analizatory wchodzące w skład systemu monitorowania synchronizowane są przy pomocy modułów GPS. Na rysunku Rys.4 przedstawiono ogólną strukturę systemu monitorowania [18]. Aplikacje dedykowane dla dużej ilości punktów pomiarowych wykorzystywać mogą kilka oddzielnych jednostek komputerowych (serwerów). W przypadku małych systemów pomiarowych struktura systemu może zostać uproszczona do instalacji na jednym komputerze (serwerze).



Rys.4. Ogólny schemat struktury środowiska WinPQ firmy A-Eberle [18].

Analiza efektywności produkcji energii elektrycznej

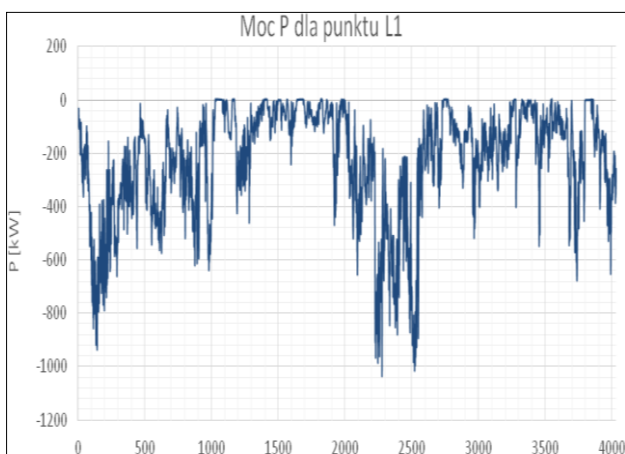
Pojęcie bilansu energetycznego ma szerokie znaczenie w kontekście systemu elektroenergetycznego oraz rozproszonych i odnawialnych źródeł energii elektrycznej. W dużym stopniu dotyczy rynku bilansującego będącego narzędziem do równoważenia zużycia i produkcji energii elektrycznej. Obecnie rynek bilansujący jest realizowany w obszarze sieci przesyłowych, jednak intensywny rozwój rozproszonych i odnawialnych źródeł energii elektrycznej wymaga, aby wprowadzić obszary lokalnego bilansowania. W niniejszej pracy bilansowanie dotyczy tylko lokalnego bilansowania bez uwzględniania mechanizmów ekonomicznych rynku energetycznego [15]. W dalszej części przedstawiono analizę wirtualnego bilansowania dla zbudowanego wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej. Analiza dotyczy porównania wolumenu produkowanej mocy/energii czynnej przez wszystkie źródła energii objęte systemem monitorowania do wolumenu mocy/energii czynnej konsumowanej przez odbiorcę w kolejnych chwilach czasowych. Obliczenia przeprowadzono na danych pomiarowych agregowanych w 10-minutowych interwałach czasu. Porównano również sumaryczną energię czynną wyprodukowaną przez wirtualne hybrydowe źródło energii w określonym przedziale czasu z sumaryczną energią pobraną przez odbiorcę w tym samym czasie. Parametry pracy wewnętrznej sieci zasilającej Akademii Górniczo-Hutniczej monitorowane są w wybranych punktach za pomocą systemu pomiarowego ION Enterprise firmy Schneider Electric oraz za pomocą jego nowszej wersji StructureWare Power Monitoring. Do AGH energia elektryczna dostarczana jest przez lokalnego operatora dwoma liniami z GPZ Łobzów i GPZ Balicka, na poziomie 15 kV. W punktach przyłączenia (rozliczeniowych) AGH do sieci operatora zainstalowano analizatory jakości energii elektrycznej kasy A model ION7650 firmy Schneider Electric. Analiza efektywności produkcji energii elektrycznej oraz wirtualnego bilansowania została przeprowadzona dla lutego 2015 roku.

Przedstawione na rysunkach Rys.5-Rys.23 wykresy powstały na bazie danych pomiarowych gromadzonych przez systemy monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych WinPQ i ION Enterprise. Z uwagi na mnogość danych pomiarowych zarówno dla źródeł energii jak i odbiorcy zamieszczono tylko wybrane dane oraz wyniki przeprowadzonych obliczeń sumarycznych. Na rysunkach Rys.5-Rys.11

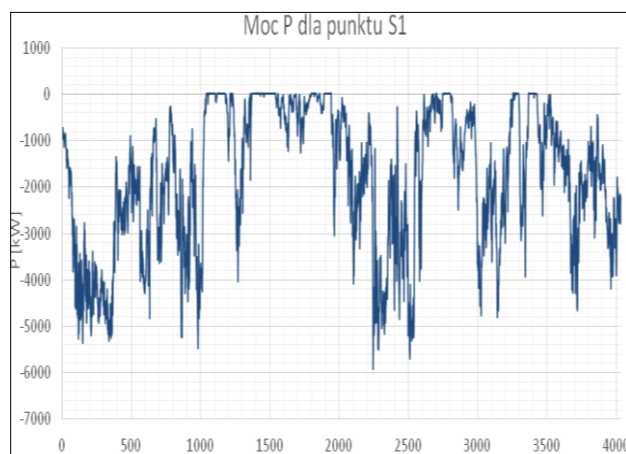
przedstawiono przebiegi mocy czynnych poszczególnych źródeł energii. Na rysunku Rys.12 pokazano sumaryczną moc czynną wirtualnej hybrydowej elektrowni. W celu zobrazowania efektywności produkcji energii elektrycznej z poszczególnych źródeł na rysunkach Rys.13-Rys.19 zamieszczono uporządkowane wykresy dla przebiegów mocy czynnych w odniesieniu do mocy zainstalowanej (P/P_n). Rysunek Rys.20 prezentuje przebieg mocy czynnej konsumowanej przez odbiorcę.

W procesie akwizycji danych pomiarowych gromadzonych przez system monitorowania przyjęto konwencję, że generowana moc i energia będzie ujemna, natomiast pobierana (zużywana) moc i energia będzie dodatnia. Kolejne wykresy przedstawiają trendy mocy czynnej zagregowanej w 10-minutowych przedziałach czasu. Przebiegi przedstawiają wartości zarejestrowane dla różnych źródeł energii, które zostały ujęte w procesie bilansowania w ramach kolejnych 10-minutowek, jak i bilansowania wolumenem za okres jednego miesiąca. W procesie bilansowania nie ujęto danych z punktu pomiarowego L2, z uwagi na niekompletność danych pomiarowych. Podczas opracowywania niniejszego opracowania zaistniała konieczność kilkukrotnej rekonfiguracji punktu L2. Źródło energii L2 nie ma istotnego wpływu na przeprowadzony bilans energetyczny ze względu na małą moc instalacji.

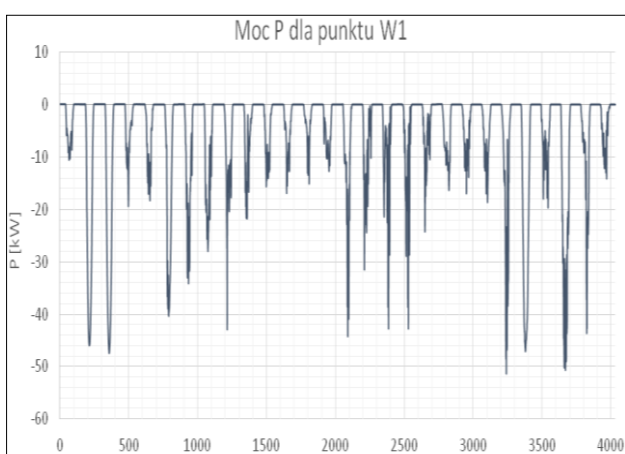
Na podstawie przedstawionych wykresów można wyraźnie zauważyć zmienność generacji analizowanych źródeł energii, w zależności od ich typów. W przypadku farm fotowoltaicznych oraz odbiorcy wyraźnie uwidaczniają się cykle dobowe.



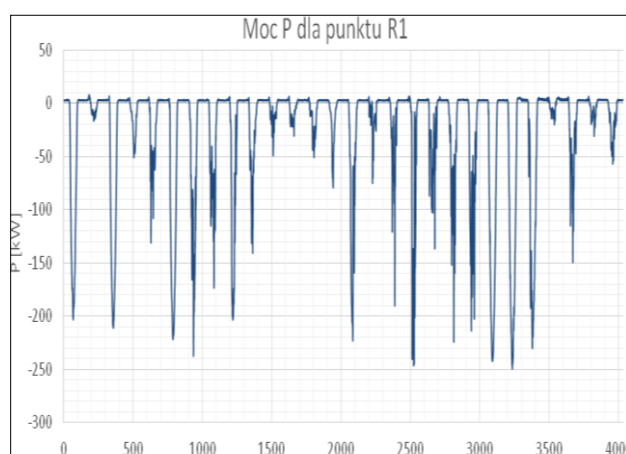
Rys.5. Moc czynna P dla obiektu L1.



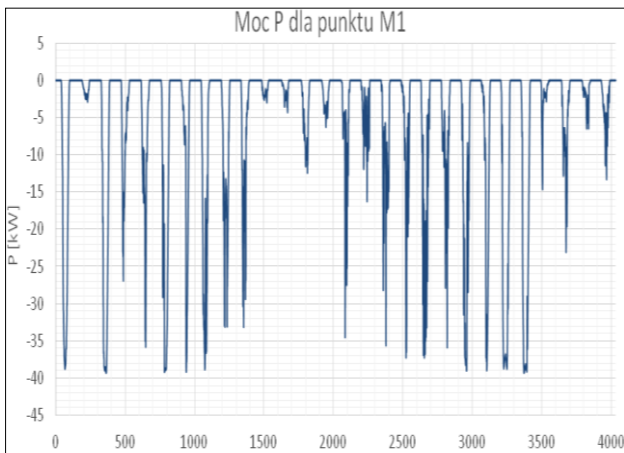
Rys.6. Moc czynna P dla obiektu S1.



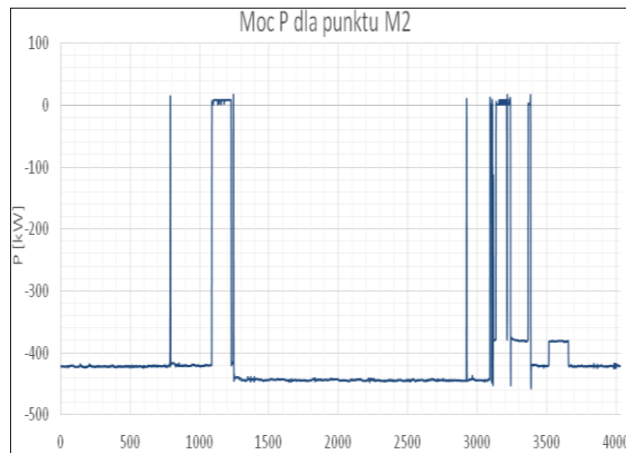
Rys.7. Moc czynna P dla obiektu W1.



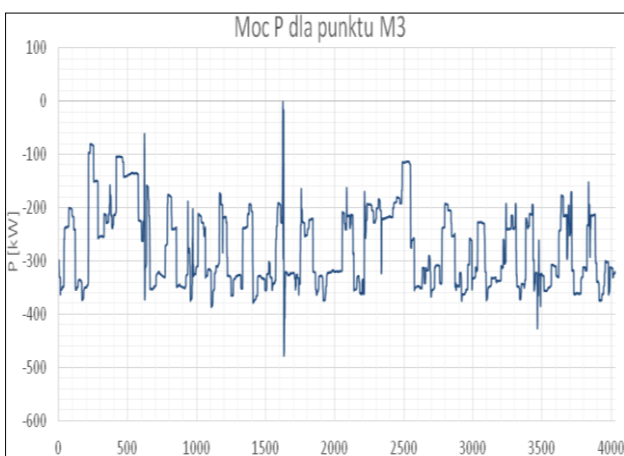
Rys.8. Moc czynna P dla obiektu R1.



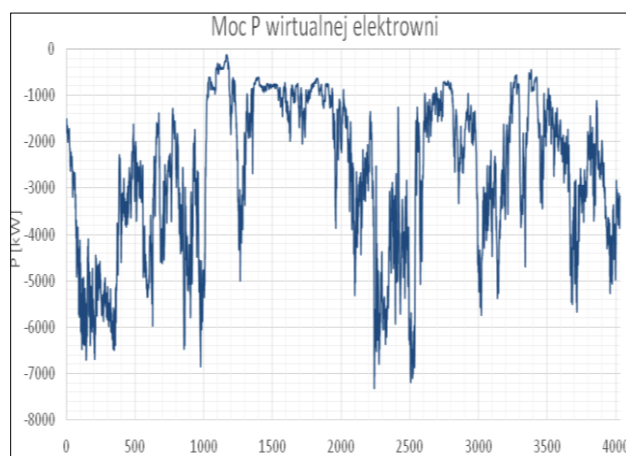
Rys.9. Moc czynna P dla obiektu M1.



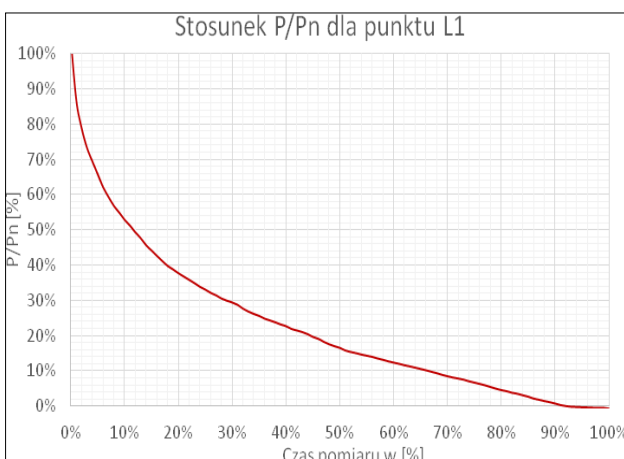
Rys.10. Moc czynna P dla obiektu M2.



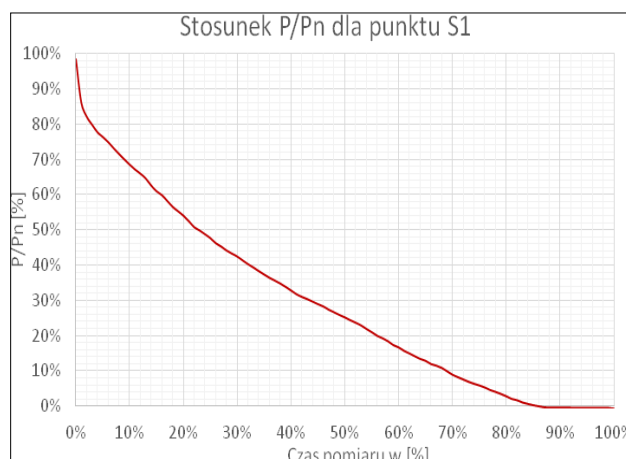
Rys.11. Moc czynna P dla obiektu M3.



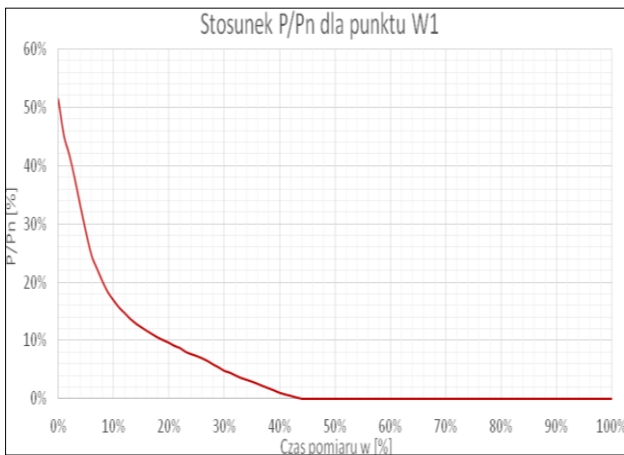
Rys.12. Moc czynna P wirtualnej elektrowni.



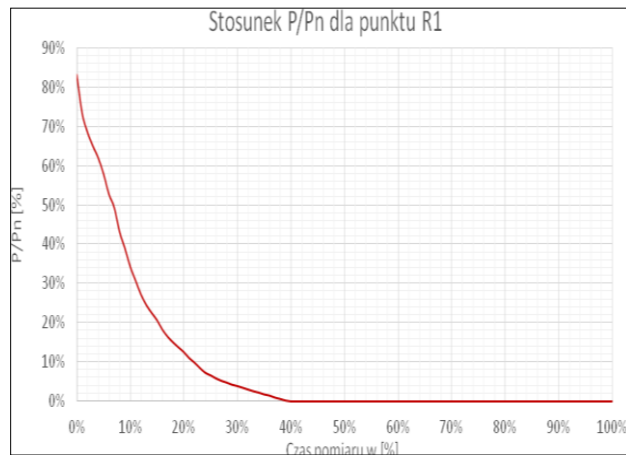
Rys.13. Relacja P/Pn dla punktu L1.



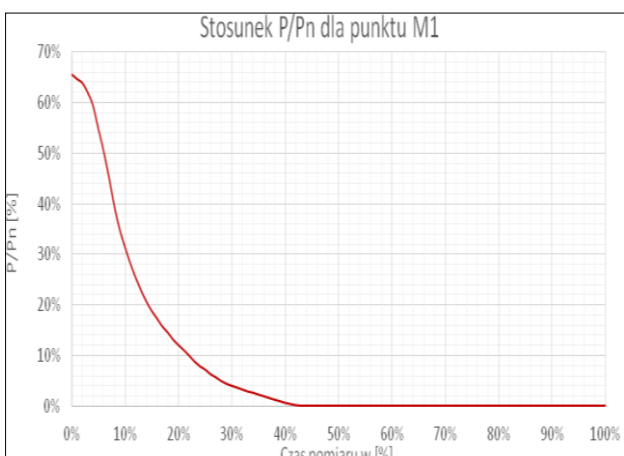
Rys.14. Relacja P/Pn dla punktu S1.



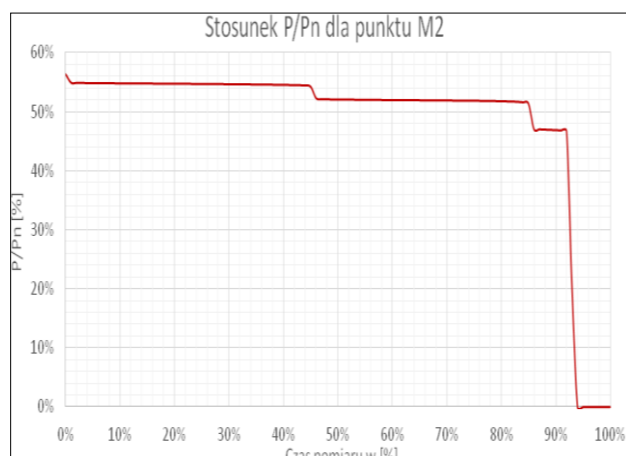
Rys.15. Relacja P/Pn dla punktu W1.



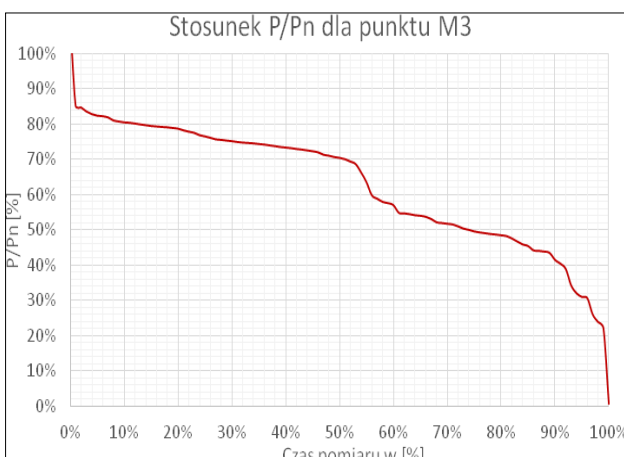
Rys.16. Relacja P/Pn dla punktu R1.



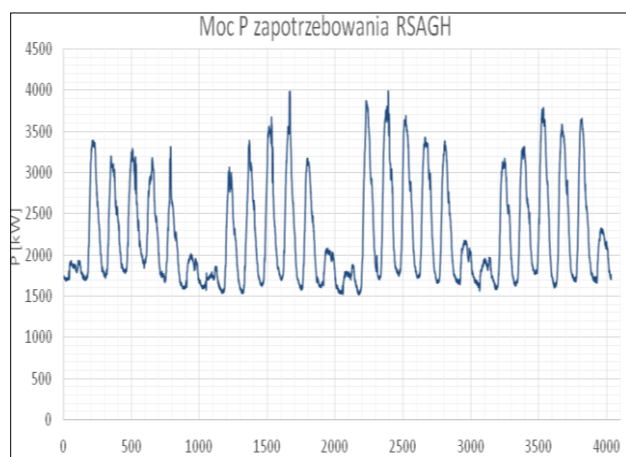
Rys.17. Relacja P/Pn dla punktu M1.



Rys.18. Relacja P/Pn dla punktu M2.



Rys.19. Relacja P/Pn dla punktu M3.

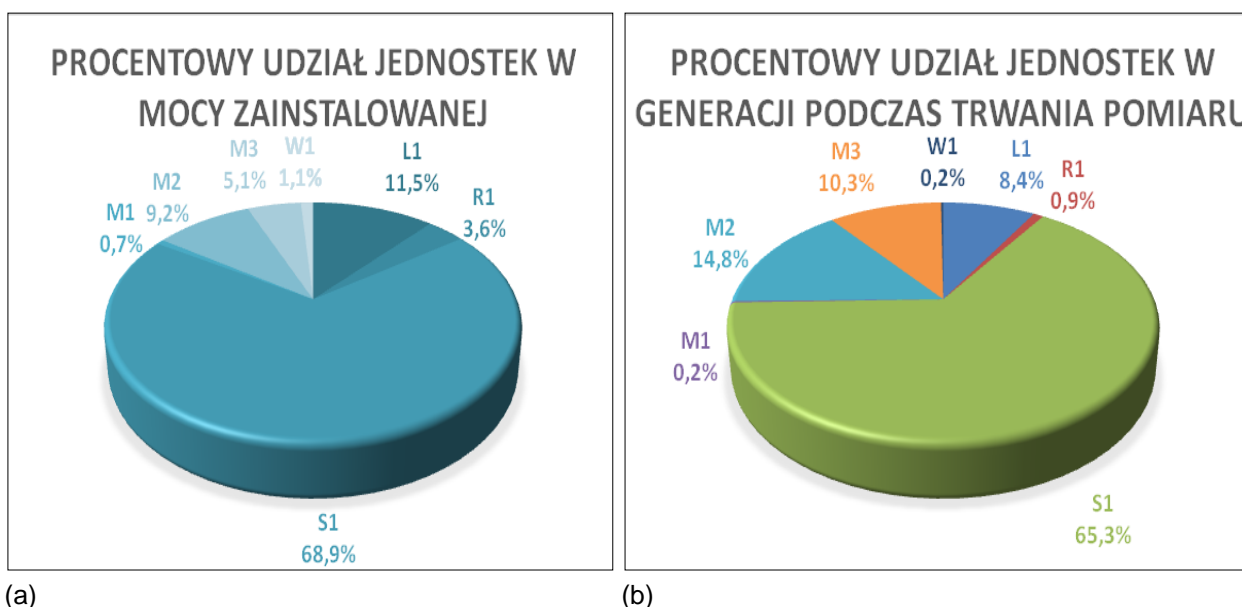


Rys.20. Moc czynna P dla odbiorcy AGH.

W trakcie analizowanych miesięcznych pomiarów, przedstawionych na wykresach uporządkowanych, można stwierdzić, że generacja na poziomie powyżej 90% mocy zainstalowanej osiągnięta jest przez bardzo krótki okres czasu (<2%) dla następujących źródeł: farmy wiatrowe L1 i S1 oraz turbina wodna M3. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w przypadku farmy fotowoltaicznej R1 osiągnięto generację na poziomie 82% mocy zainstalowanej, następnie dla farmy fotowoltaicznej M1 66%, generatora biogazowego

M2 57%, farmy fotowoltaicznej W1 52%. Istotną informacją o stanie pracy źródeł jest czas występowania generacji w analizowanym okresie. Przez 100% czasu trwania pomiaru pracowało tylko jedno źródło, a mianowicie turbina wodna M3. Generator biogazowy M2 pracował przez 93%, turbina wiatrowa L1 przez 92%, farma wiatrowa S1 przez 86%, farmy fotowoltaiczne: W1 przez 44%, M1 przez 42% oraz R1 przez 39% czasu trwania pomiaru. Z charakterystyk uporządkowanych wyznaczono czas pracy źródeł, w którym generacja energii elektrycznej przekraczała 50% mocy zainstalowanej. W tym przypadku źródła przedstawiają się następująco: M2 85%, M3 73%, L1 11%, R1 6%, M1 6%, S1 22%, W1 ~1%.

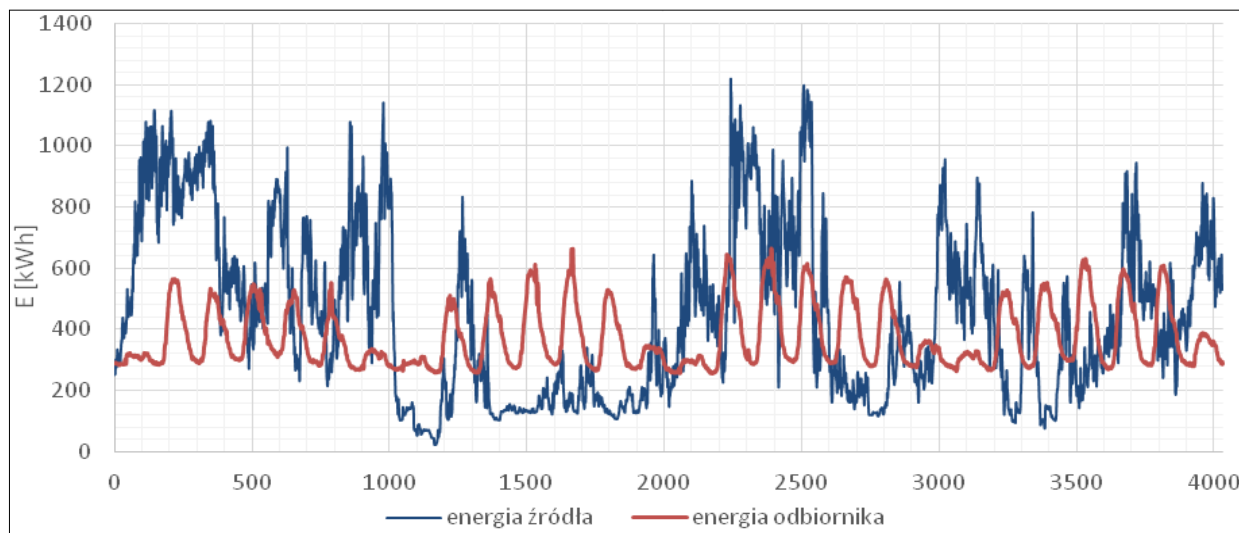
Na podstawie danych pomiarowych, z analizowanego miesiąca, można stwierdzić, że wirtualna elektrownia generuje energię przez 100% czasu. Udział procentowy poszczególnych jednostek wytwórczych w całkowitej mocy zainstalowanej hybrydowej wirtualnej elektrowni przedstawiono na rysunku Rys.21(a) za pomocą diagramu kołowego. Udziały poszczególnych źródeł wynoszą: farma fotowoltaiczna M1 0,7%, farma fotowoltaiczna W1 1,1%, farma fotowoltaiczna R1 3,6%, generator z turbiną wodną M3 5,1%, generator biogazowy M2 9,2%, turbina wiatrowa L1 11,5%, farma wiatrowa S1 68,9%. Dominującym źródłem energii ze względu na zainstalowaną moc są farmy wiatrowe. Na rysunku Rys.21(b) pokazano diagram kołowy procentowego udziału jednostek w generacji podczas analizowanego okresu. Warto podkreślić, że generator współpracujący z turbiną wodną generuje 10,3% energii przy udziale 5,1% w mocy zainstalowanej, a generator biogazowy produkuje 14,8% energii elektrycznej hybrydowego źródła przy 9,2% udziale w mocy zainstalowanej. Spowodowane jest to tym, iż turbina wodna, jako jedyne źródło, generowała energię przez blisko 100% czasu trwania pomiaru, a generator M2 przez 93% czasu trwania pomiaru sponad 50% relacją P/Pn. Udział farm wiatrowych w produkcji: L1 8,4%, S1 65,3%.



Rys.21. Procentowe udziały źródeł energii: (a) w sumarycznej mocy zainstalowanej, (b) w sumarycznej generacji.

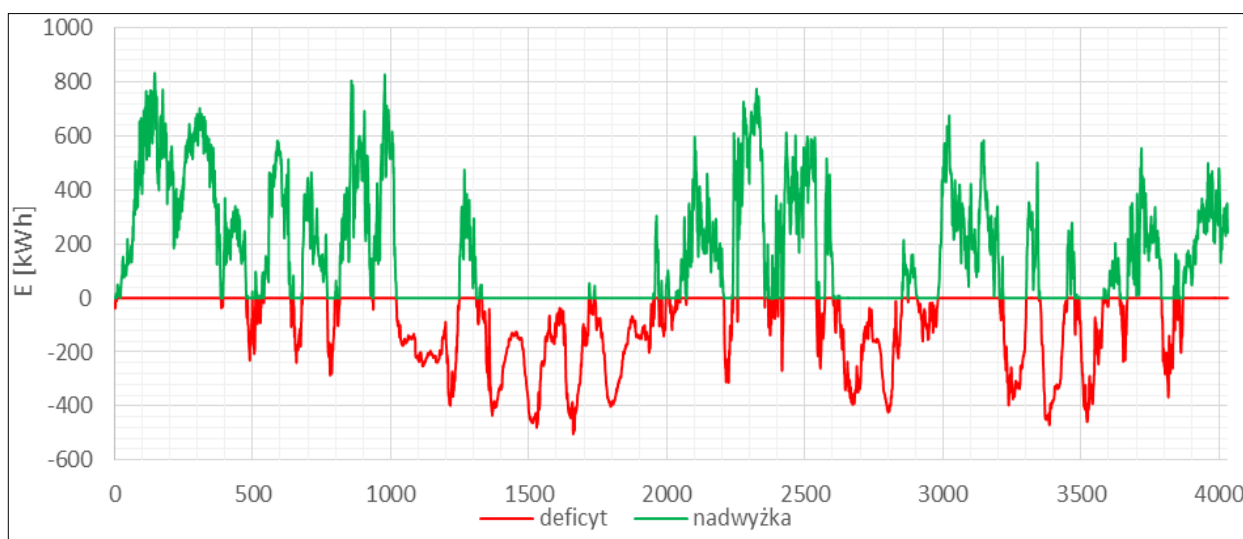
Wirtualny bilans energetyczny

Kolejny wykres, pokazany na rysunku Rys.22, przedstawia nałożone na siebie dwa przebiegi: energii czynnej generowanej przez wirtualne hybrydowe źródło energii oraz energii pobieranej przez odbiorcę (AGH). Zapotrzebowanie na energię odbiornika ma charakter cykliczny i jest związane z normalnym trybem pracy uczelni (dni robocze, dni weekendowe, dzień, noc). W celu zwiększenia czytelności zmieniono znak przebiegu energii generowanej z ujemnego na dodatni.



Rys.22. Porównanie energii czynnej pobieranej przez odbiorcę z energią czynną generowaną przez wirtualne hybrydowe źródło energii elektrycznej w 10-minutowych okresach czasu.

Na wykresie (Rys.22) widoczne są okresy, w których sumaryczna wartość generowanej energii przekracza poziom zużywanej energii przez odbiorcę, jak również okresy, w których pojawiają się niedobory. Kolejny wykres zamieszczony na rysunku Rys.23 przedstawia bilans energetyczny źródła i odbiornika. Kolorem zielonym oznaczono nadwyżki, a czerwonym deficyt energii w kWh (analogicznie jak na Rys.22 zmieniono znak dla energii generowanej).



Rys.23. Krzywa bilansowania energii czynnej konsumowanej przez odbiornik z energią czynną generowaną przez wirtualne hybrydowe źródło energii elektrycznej w 10-minutowych okresach czasu.

Na podstawie pomiarów obliczono, że skumulowane zużycie energii czynnej w AGH w badanym okresie czasu wyniosło 1510,1 MWh. W tym samym przedziale czasu wirtualna hybrydowa elektrownia wygenerowała 1806,9 MWh energii czynnej. Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że w bilansie energetycznym wirtualnej hybrydowej elektrowni i odbiorcy, dla analizowanego przedziału czasu, przeważają okresy równowagi oraz nadwyżki produkcji energii, które występują przez 53% czasu trwania pomiaru. Wartość skumulowana nadwyżki energii wynosi 296,8 MWh.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zbudowany w ramach projektu POIG finansowanego przez NCBiR rozproszony system monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych z rozproszonymi i odnawialnymi źródłami energii, zgodnie z koncepcją inteligentnych systemów pomiarowych smart metering. System monitorowania bazuje na środowisku WinPQ, dedykowanym do monitorowania jakości energii elektrycznej, oraz analizatorach PQI-DA, posiadających certyfikat klasy A. Budowa systemu pozwoliła na stworzenie wirtualnego, hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z rozproszonych i odnawialnych źródeł energii. Artykuł poświęcono analizie pracy wirtualnej hybrydowej elektrowni oraz wirtualnemu bilansowaniu dla wybranego przedziału czasu. Do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystano energię wiatru, wody, promieniowania słonecznego oraz biogazu, będącego ubocznym produktem oczyszczania ścieków. Zatem produkcja realizowana jest z wykorzystaniem turbin wiatrowych, turbiny wodnej, paneli fotowoltaicznych oraz zespołu silnik biogazowy – generator synchroniczny. Poszczególne jednostki wytwórcze zlokalizowane są na terenie całego kraju. W referacie przedstawiono strukturę wirtualnego, hybrydowego źródła energii oraz charakterystykę pracy wykorzystywanych instalacji wytwórczych. Suma mocy zainstalowanych w źródłach wynosi 8718 kWp (z uwzględnieniem ograniczeń), a w podziale na rodzaj źródła energii: farmy wiatrowe 7000 kWp, farmy fotowoltaiczne 478 kWp, generator biogazowy 800 kWp i turbina wodna 440 kWp. Przeprowadzono i zaprezentowano również wirtualny bilans energetyczny z uwzględnieniem energii konsumowanej przez dużego odbiorcę instytucjonalnego (AGH). Rzeczywiste zapotrzebowanie odbiorcy na moc nie przekracza 4200 kW, przy mocy umownej 6000 kW. W wyniku przeprowadzonego wirtualnego bilansowania można stwierdzić, że w bilansie energetycznym wirtualnej hybrydowej elektrowni i odbiorcy, dla analizowanego okresu, przeważają stany równowagi i nadwyżki generowanej energii, które występują przez 53% czasu trwania pomiaru. Wartość skumulowana nadwyżki energii czynnej wynosi 296,8 MWh, przy wolumenie energii wyprodukowanej wynoszącej 1806,9 MWh i wolumenie energii zużytej wynoszącej 1510,1 MWh. Dodatkowo system monitorowania pozwala na: kompleksową analizę i ocenę jakości energii elektrycznej, diagnostykę stanu pracy monitorowanych sieci elektroenergetycznych, lokalizację źródeł zdarzeń/zaburzeń, analizę stanów awaryjnych i wyjaśnianie ich przyczyn. Stanowi również źródło danych elektrycznych dla systemu SCADA, w którym realizowane jest prognozowanie produkcji energii przez odnawialne źródła energii elektrycznej z uwzględnieniem pomiarów i prognoz meteorologicznych.

Literatura

- [1] Krajowy Raport Benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych, Praca zrealizowana w ramach projektu nr 2006/018-180.02.04 finansowanego przez Unię Europejską ze środków Transition Facility PL2006/018-180.02.04 „Wdrażanie konkurencyjnego rynku energii” Nr ref. 2006/018-180.02.04.02 – Część B
- [2] T. Szczepański, J. Rączka: „Monitorowanie jakości energii elektrycznej w sieci przesyłowej”, Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój, Numer 1(7)/2011, ISSN-2080-8593
- [3] A. Cieśla, Z. Hanzelka: „Inteligentne systemy elektroenergetyczne (ang. Smart Grid)”, www.smartgrid.ahg.edu.pl – portal poświęcony inteligentnym systemom elektroenergetycznym tzw. smart grids prowadzony w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie
- [4] PN-EN 61000-4-30 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-30: Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii, www.pkn.pl
- [5] G. Błajszczak G., A. Firlit: „Narzędzia do oceny i analizy jakości energii elektrycznej”, Energetyka 2009, nr 12, s. 787-793
- [6] R. Neumann: „The importance of IEC 61000-4-30 Class A for the Coordination of Power Quality Levels”, 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, 09-11.10.2007
- [7] M.H.J. Bollen, J. Zhong et al.: „Power Quality aspects of Smart Grids”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada (Spain), 23th to 25th March, 2010.
- [8] P. Biczek: „Wytwarzanie energii w mikrosieciach”, AUTOMATYKA-ELEKTRYKA-ZAKŁÓCENIA, nr 4, 2011.
- [9] M.H.J. Bollen, J.V. Milanović, N. Čukalevski: „CIGRE/CIRED JWG C4.112 – Power Quality Monitoring”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba (Spain), 8th to 10th April, 2014, Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ) ISSN 2172-038 X, No.12, April 2014
- [10] J.Kilter, J.Meyer, B.Howe, F.Zavada, L.Tenti, J.V.Milanović, M.Bollen, P.F. Ribeiro, P.Doyle, J.M.R. Gordon: “Current Practice and Future Challenges for Power Quality Monitoring – CIGRE WG C4.112 Perspective”, 978-1-4673-1943-0/12 2012 IEEE
- [11] J.Meyer, J.Kilter, B.Howe, F.Zavoda, L.Tenti, J.M.R.Gordon, J.V.Milanović: “Contemporary and Future Aspects of Cost Effective Power Quality Monitoring – Position Paper of CIGRE WG C4.112”, 978-1-4673-1979-9/12 2012 IEEE
- [12] J. Rakowski: „Wybrane problemy smart gridu i smart meteringu”, Elektroenergetyka Współczesność i Rozwój, nr 1-2/11-12.2012
- [13] J.Popczyk: „Widmo II fali stranded costs w polskiej energetyce w kontekście potencjalnego miksu energetycznego 2050 a ustawa o wspomaganiu OZE”, Elektroenergetyka Współczesność i Rozwój, nr 4/2011
- [14] J.Popczyk: „Energetyka rozproszona jako odpowiedź na potrzeby rynku (prosumenta) i pakietu energetyczno-klimatycznego”, FUNDAC, Warszawa 2010
- [15] Van Gerwen R.: „Generacja rozproszona i odnawialne źródła energii”, Jakość zasilania – poradnik Tom 8.1, Polskie Centrum Promocji Miedzi 2006
- [16] H.Saboori, M.Mohammadi, R.Taghe: “Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types”, 978-1-4244-6255-1/11 2011 IEEE
- [17] PN-EN 61000-4-7:2007 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-7: Metody badań i pomiarów - Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznnych i interharmonicznnych oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń
- [18] materiały firmy AEberle, www.a-eberle.de
- [19] materiały firmy Schneider Electric, www.schneider-electric.com