



Jacek WASILEWSKI*, Krzysztof KARKOSZKA*

Elektrownie wirtualne na rynkach mocy i energii – analiza warunków krajowych

STRESZCZENIE: W niniejszym artykule scharakteryzowano potencjał integracji rozproszonych zasobów energetycznych (w ramach struktury zwanej „wirtualną elektrownią”) w kontekście działania na rynku energii, jak również świadczenia wybranych usług dla operatorów systemowych i sieciowych. Przeanalizowano wybrane technologie generacji rozproszonej, małych zasobników energii oraz odbiorów sterowalnych z punktu widzenia pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Scharakteryzowano ich podstawowe parametry i właściwości, takie jak moc (energia w przypadku zasobników) pojedynczych jednostek, możliwość ich łączenia w większe instalacje, przewidywalność pracy oraz możliwość sterowania mocą. Następnie przedstawiono specyfikę pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, a w szczególności wskazano na zapotrzebowanie operatora systemu przesyłowego na usługi regulacyjne. Scharakteryzowano aktualne wymagania operatora dotyczące świadczenia takich usług. Wskazano na brak aktualnego wykorzystania w dużej skali możliwości regulacyjnych na poziomie rozproszonych zasobów energii, zarówno podażowych, jak i popytowych (na poziomie sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia). W kolejnej części artykułu przedstawiono potencjalne obszary biznesowe dla działania wirtualnych elektrowni, tj. wytwarzanie i obrót energią, agregacja handlowo-techniczna w ramach wewnętrznej grupy bilansującej oraz świadczenie usług regulacyjnych dla operatorów sieci elektroenergetycznych. Przeanalizowano również warunki i przykłady komercyjnego działania wirtualnych elektrowni na rynkach w Niemczech, co mogłoby stanowić przykład dla wprowadzenia odpowiednich regulacji w Polsce. Artykuł zakończono podsumowaniem i wnioskami. Stwierdzono, że sprzężenie idei rozproszonych zasobów energetycznych, ich integracji oraz ciągle rozwijającej się technologii *smart grid* może być w obecnych i przyszłych uwarunkowaniach prawnych, rynkowych i społecznych

* Dr inż. – PSE Innowacje sp. z o.o.

bardzo korzystnym rozwiązaniem. Zaproponowano również podjęcie dalszych działań badawczych w tym kierunku.

SŁOWA KLUCZOWE: elektrownia wirtualna, rozproszone zasoby energetyczne, usługi systemowe, generacja rozproszona, zasobniki energii, odbiory sterowalne

Wprowadzenie

W perspektywie rozwoju energetyki na świecie istotnym jej składnikiem są rozproszone zasoby energetyczne (RZE). Wirtualna integracja oraz aktywne oddziaływanie na poszczególne obiekty RZE, takie jak: generacja rozproszona (GR), zasobniki energii (ZE) oraz odbiory sterowalne (OS) wpisują się w szeroki paradygmat tzw. sieci inteligentnych (ang. *smart grids*) nie tylko w obszarze systemów elektroenergetycznych, ale także na styku systemów zaopatrzenia w paliwa, ciepło lub chłód. W literaturze (Dielmann i van der Velden 2003; Asmus 2010; Schulz i in. 2005) wskazuje się, że istnieje techniczny i ekonomiczny potencjał integracji organizacyjnej obiektów RZE. Tego typu agregacja zapewnia możliwość obrotu istotnymi wolumenami energii oraz świadczenia różnego rodzaju usług, m.in. dla operatorów systemów przesyłowych (OSP), operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) czy nawet indywidualnych odbiorców. Z założenia, korzyści mogą odnosić również właściciele lub zarządcy poszczególnych jednostek RZE.

Coraz większy udział stochastycznego składnika generacji (źródła wiatrowe, fotowoltaiczne) w bilansie mocy systemów elektroenergetycznych (SEE) jest istotnym problemem operatorów przesyłowych (OSP) w różnych krajach na świecie z wysokim udziałem tego typu generacji. Problem ten jest spowodowany przede wszystkim brakiem istotnych zdolności magazynowania energii elektrycznej na skalę SEE. Często szczyt generacji mocy przez lądowe przymorskie farmy wiatrowe pokrywa się z występowaniem doliny obciążenia, co może powodować konieczność odstawiania części podstawowych elektrowni cieplnych (np. Niemcy). Fakt ten powoduje zmniejszenie sterowalności pracy SEE, zarówno w kontekście redukcji liczby sterowalnych węzłów sieci, jak również redukcji mas wirujących wspomagających regulację mocy i częstotliwości (Impacts... 2011; Ziems i in. 2012).

Bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) wiąże się z procesami bilansowania technicznego mocy oraz regulacją parametrów technicznych, istotnych z punktu widzenia pracy systemu. Działania te wiążą się z zakupem przez operatora systemu przesyłowego (OSP) określonych usług systemowych, ściśle zdefiniowanych i szeroko opisanych w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) (Instrukcja... 2011; 2010).

Od wielu lat znanych jest kilka rodzajów środków zaradczych zapewniających elastyczne bilansowanie i regulację mocy w systemie, z uwzględnieniem znaczącego udziału generacji wiatrowej. Są to (Kwiatkowski 2010):

- ◆ działania dostosowawcze w zakresie istniejących w SEE i nowo budowanych sterowalnych źródeł energii,
- ◆ uruchomienie środków sterowania popytem na moc,
- ◆ wykorzystanie zasobników energii,
- ◆ działania dostosowawcze w zakresie zwiększenia liczby połączeń między systemami poszczególnych krajów.

W światowej literaturze wskazuje się, że istnieje techniczny i ekonomiczny potencjał świadczenia usług systemowych dla OSP (z uwzględnieniem wymienionych środków zaradczych), wykorzystując RZE, tj. małych sterowalnych jednostek wytwórczych, zasobników energii oraz sterowalnych odbiorów. Korzystając z systemów teleinformatycznych, możliwe jest stworzenie zagregowanej, w sensie wirtualnym struktury, mogącej świadczyć usługi systemowe nie tylko dla OSP, ale również wspomagać lokalnie pracę OSD. Takie podejście nosi nazwę wirtualnej elektrowni.

1. Obecne uwarunkowania rozwoju i pracy rozproszonych zasobów energii w Polsce

1.1. Generacja rozproszona

Rozwój generacji rozproszonej (GR) w Europie, w tym źródeł odnawialnych (OZE) i pracujących w kogeneracji (ang. *combined heat and power* – CHP) jest ściśle związany z regulacjami prawnymi na poziomie europejskim oraz krajowym, jak również powiązanych z nimi – instrumentami zachęt ekonomicznych dla potencjalnych inwestorów.

Obecnie w warunkach krajowych małe instalacje oraz mikroinstalacje wytwórcze, które są przyłączane do sieci średniego (SN) lub niskiego napięcia (nn) można scharakteryzować w następujący sposób (Ustawa... 1997; 2015; Rozp.... 2007):

- ◆ z punktu widzenia sieci dystrybucyjnej – jednostki GR są przyłączane wg zasady „przyłącz i zapomnij” (ang. *connect and forget*), tj. do sieci przyłączane są źródła, których praca z mocą osiągalną nie prowadzi do wystąpienia przeciążeń w tej sieci ani do wystąpienia przekroczeń poziomów napięć (w tym poszczególnych parametrów jakości energii). OSD nie jest w tym przypadku zobligowany do śledzenia mocy generowanej czy też stopnia obciążenia gałęzi sieci (linii elektroenergetycznych i transformatorów) oraz wartości modułów napięć w poszczególnych węzłach. Sieci dystrybucyjne pracujące według tej zasady należy uznać za najslabiej wykorzystane z punktu widzenia ich zdolności przesyłowych,
- ◆ z punktu widzenia rynku energii elektrycznej – osoby fizyczne lub prawne dysponujące źródłami GR, sprzedają energię na rynku regulowanym, tj. przy stałej lub będącej funkcją średniej ceny na rynku hurtowym z poprzedniego roku (z uwzględnieniem świadectw pochodze-

nia energii) oraz ceny będącej wynikiem aukcji. Ceny sprzedaży energii „sprzedawcom zobowiązanym” (sprzedawcom energii elektrycznej wyznaczonych przez Prezesa URE, którzy będą realizować nałożony przepisami ustawy o OZE obowiązek zakupu energii elektrycznej wytworzonej w OZE) są generalnie stałe i nie odzwierciedlają zmienności dobowej i sezonowej zapotrzebowania na moc w KSE. Tym samym, wytwórcy OZE maksymalizują zwój zysk poprzez maksymalizację wytwarzania energii (w zakresie dostępnych pierwotnych nośników energii – słońca czy wiatru). W okresie doliny zapotrzebowania i wysokiej generacji mocy z OZE (w szczególności źródeł wiatrowych) może dochodzić na niektórych rynkach do nadwyżki rzeczywistej podaży energii w stosunku do popytu na nią,

- ◆ z punktu widzenia KSE – jednostki GR nie są wykorzystywane w aktywnym bilansowaniu mocy w systemie, tzn. nie wchodzą w skład jednostek grafikowych (określonego zbioru miejsc dostarczania energii) wytwórczych aktywnych na rynku bilansującym oraz nie świadczą usługi rezerwy operacyjnej ani interwencyjnej. W procesie operacyjnego bilansowania pracy KSE (tworzenia planów koordynacyjnych) energia wytworzona w jednostkach GR jest zwykle wliczana jako ujemny składnik zapotrzebowania (w ramach jednostek grafikowych odbiorczych na rynku bilansującym). Małe źródła GR nie świadczą obecnie usług regulacji mocy i częstotliwości czy też napięć i mocy biernej w KSE.

GR opiera się na dwóch klasach technologii (Paska 2010; Parol i in. 2013):

- ◆ technologie wykorzystujące konwencjonalne paliwa kopalne jako nośniki energii, z dominacją gazu ziemnego w silnikach tłokowych, turbinach (mikroturbinach) gazowych i ogniwach paliwowych; coraz powszechniej stosuje się także procesy skojarzone (kogeneracja, trigeneracja, poligeneracja),
 - ◆ technologie wykorzystujące odnawialne zasoby energii do pozyskiwania ciepła (kolektory słoneczne, geotermia) lub energii elektrycznej (małe elektrownie wodne, elektrownie wiatrowe, zasilane biomasą, biogazownie, fotowoltaika).
- Z punktu widzenia pracy KSE źródła GR można podzielić na (Paska 2010; Parol i in. 2013):
- ◆ źródła spokojne – moc generowana w czasie praktycznie nie ulega zmianom, pomijając sterowanie operatorskie; są to źródła, w których energia uzyskiwana jest w wyniku spalania, reakcji jądrowych oraz te, których źródłem energii jest przepływająca woda, tj. elektrownie z turbinami lub silnikami cieplnymi oraz turbinami wodnymi,
 - ◆ źródła niespokojne – moc generowana ulega ciągłym fluktuacjom (charakter silnie stochastyczny); należą do nich źródła, w których energia uzyskiwana jest przede wszystkim ze strumienia wiatru, falowania wody lub promieniowania słonecznego.

Moc zainstalowana pojedynczych jednostek GR waha się w zakresie od kilkudziesięciu watów do kilku megawatów, przy czym jednostki te mogą być łączone lokalnie w większe instalacje, ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń oraz dostępną mocą przyłączeniową w danym węźle sieci dystrybucyjnej.

Przewidywalność pracy poszczególnych rodzajów źródeł GR jest związana przede wszystkim z rodzajem i dostępnością wykorzystywanego nośnika przetwarzanej energii. Źródła paliwowe (przy założeniu jego krótkoterminowej dostępności) mogą być niezależnie harmonogramowane lub ich praca może być uzależniona od lokalnego zapotrzebowania na ciepło (jednostki

CHP). Przewidywalność pracy źródeł paliwowych maleje w przypadku wykorzystania biopaliw (w tym biogazu i biomasy). Dostępność do biopaliw oraz ich właściwości chemiczne wiążą się ściśle z procesem ich wytwarzania. Możliwość krótkoterminowego harmonogramowania pracy dotyczy również małych elektrowni wodnych typu zbiornikowego, przy czym w szerszej perspektywie zasoby energetyczne mogą być jedynie prognozowane, ze względu na zależność uzupełniania zbiornika od warunków hydro- i meteorologicznych. Hydroelektrownie nieposiadające zbiornika pracują w zależności od bieżącego dopływu wody. Generacja mocy w jednostkach GR opartych na energii kinetycznej wiatru i promieniowania słonecznego jest ściśle związana z lokalnymi warunkami meteorologicznymi i praca tego typu źródeł jest elementem procesu prognozowania.

Z punktu widzenia pracy KSE istotna jest możliwość wpływu na wytwarzanie mocy i energii w źródłach GR. Sterowalność wytwarzania mocy czynnej jest największa w przypadku jednostek paliwowych, w których można regulować (na podstawie wartości zadanej) czynnik napędowy turbiny (silnika) lub intensywność zachodzenia reakcji chemicznej w przypadku ogniw paliwowych. W pozostałych technologiach możliwe jest jedynie wyłączanie pojedynczych jednostek GR lub ich ciągów. Płynna regulacja mocy czynnej jest możliwa również dla dużych elektrowni wiatrowych, przy czym bezwzględny zakres regulacji zależy od bieżących zasobów energii wiatru.

Właściwości poszczególnych technologii GR z punktu widzenia pracy KSE przedstawiono w tabeli 1.

1.2. Zasobniki energii

Obecność rozproszonych zasobników energii (ZE) w KSE jest związana przede wszystkim z zapotrzebowaniem odbiorców (wliczając w to potrzeby własne działania obiektów infrastruktury elektroenergetycznej) na określoną jakość zasilania w energię elektryczną, tj. niezawodność zasilania oraz jakość napięcia (np. wahania i zapady napięcia). Najpopularniejsze technologie stosowane do tego celu to: elektrochemiczne zasobniki energii, kinetyczne zasobniki energii oraz superkondensatory. Wyróżnić można także pewne zasoby magazynów energii w transporcie w postaci energii chemicznej (akumulatory) czy kinetycznej (masy pojazdów w ruchu), jednak obecnie są niewykorzystywane w pracy KSE w sposób aktywny. Sprzężenie systemu elektroenergetycznego i transportowego jest przedmiotem wielu projektów badawczych w Europie i na świecie (Sekyung 2010; Guille i Gross 2009).

Elektrochemiczne zasobniki energii są najpowszechniej stosowanymi urządzeniami umożliwiającymi magazynowanie energii elektrycznej. Energia jest przechowywana w formie potencjału elektrochemicznego (magazynowanie pośrednie), a energia elektryczna jest generowana dzięki reakcjom elektrochemicznym zachodzącym w elektrolicie oraz na styku elektrolitu i elektrod. Zasobniki stosowane w instalacjach stacjonarnych można podzielić na trzy podstawowe grupy (Paska 2012):

TABELA 1. Charakterystyka wybranych technologii generacji rozproszonej z punktu widzenia pracy KSE (Paska 2010; Parol i in. 2013)

TABLE 1. Description of the selected technologies of distributed generation in terms of the National Power System' operation (Paska 2010; Parol et al. 2013)

Technologia GR	Moce pojedynczych jednostek GR	Możliwość łączenia jednostek GR	Przewidywalność pracy	Sterowanie mocą
Silnikowe zespoły prądotwórcze (gazowe, Diesla)	od $x \cdot 10^0$ kW do $x \cdot 10^0$ MW	tak – ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń	programowalne lub sterowane zapotrzebowaniem na ciepło (CHP)	tak
Turbozespoły gazowe	od $x \cdot 10^0$ MW do $x \cdot 10^0$ MW	tak – ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń	programowalne	tak
Mikroturbiny gazowe	od $x \cdot 10^1$ kW do $x \cdot 10^2$ kW	tak – ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń	programowalne lub sterowane zapotrzebowaniem na ciepło (CHP)	tak
Wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe	od $x \cdot 10^2$ kW do $x \cdot 10^0$ MW	tak – ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń	programowalne lub sterowane zapotrzebowaniem na ciepło (CHP)	tak
Niskotemperaturowe ogniwa paliwowe	od $x \cdot 10^2$ W do $x \cdot 10^2$ kW	tak – ograniczone terenem lub kubaturą pomieszczeń	programowalne lub sterowane zapotrzebowaniem na ciepło (CHP)	tak
Małe i mikrohydro-elektrownie	od $x \cdot 10^0$ kW do $x \cdot 10^0$ MW	nie	prognozowalne (elektrownie bez zbiornika) lub częściowo programowalne (elektrownie zbiornikowe)	nie*/tak
panele fotowoltaiczne	do $x \cdot 10^2$ W	tak – ograniczone terenem lub powierzchnią budynku	prognozowalne	nie**
elektrownie (turbozespoły) wiatrowe	do $x \cdot 10^0$ MW	tak, ograniczone terenem	prognozowalne	częściowo***

gdzie: x – liczba naturalna tożsama z pojęciem „kilka”;

* W przypadku mikrohydroelektrowni – tylko wyłączenie (zamykanie przepływu turbinowego i uruchamianie bypassu rzecznoego).

** Tylko wyłączenie poszczególnych łańcuchów paneli.

*** W większych jednostkach istnieje możliwość regulacji mocy określonym zakresie, w mniejszych – tylko wyłączenie poszczególnych turbozespołów wiatrowych.

- ◆ baterie akumulatorów (ogniw galwanicznych) budowane w różnych technologiach, m.in.: kwasowo-ołowiowe, sodowo-siarkowe, litowo-jonowe,
- ◆ baterie przepływowe budowane w różnych technologiach: cynkowo-bromowe, utleniająco-redukujące VRB (ang. *vanadium redox battery*), PSB polisulfidowo-bromkowe (ang. *poly-sulfide bromide battery*),
- ◆ ogniwa paliwowe budowane w różnych technologiach, m.in.: z kwasem fosforowym PAFC (ang. *phosphoric acid fuel cell*), z elektrolitem ze stopionego węgla MCFC (ang. *molten carbonate fuel cell*), z elektrolitem ze stałych tlenków metali SOFC (ang. *solid oxide fuel cell*).

W warunkach krajowych, komercyjne zastosowanie zasobników elektrochemicznych w ramach RZE dotyczy w zasadzie pierwszej z wyżej wymienionych grup. Akumulatory charakteryzują się akceptowalnym poziomem sprawności przetwarzania energii (60–92% w zależności od rodzaju akumulatora) do magazynowania oraz średnim (w porównaniu z innymi technologiami) poziomem gęstości mocy (kilkaset W/kg) i energii (kilkaset Wh/kg). Przy założeniu określonego czasu eksploatacji, dopuszczalna liczba cykli ładowania/rozładowania przypada około jednego razu na dobę. Poziom samorozładowania akumulatorów jest istotny tylko z perspektywy długoterminowej (rzędu kilku tygodni). Druga i trzecia grupa wymienionych rodzajów elektrochemicznych zasobników energii, tj. baterie przepływowe oraz ogniwa paliwowe, są w dalszym ciągu przedmiotem różnych projektów badawczych i pilotażowych (na poziomie instalacji stacjonarnych RZE) (Paska 2012).

Powszechnie stosowanymi magazynami energii na poziomie RZE są także kinetyczne zasobniki energii, zwane także kołami zamachowymi, w których silnik elektryczny zamienia energię elektryczną na energię mechaniczną. Wirnik silnika, sprzęgnięty z wałem koła zamachowego, rozpędza je i w ten sposób przekazuje do niego energię. Energia zostaje zmagazynowana w masie wirującego koła zamachowego. Zasobnik kinetyczny zaczyna oddawać energię w chwili, gdy wał koła zamachowego zostaje sprzęgnięty z wirnikiem generatora, w którym energia mechaniczna jest zamieniana na energię elektryczną (Paska 2012). Zaletą zasobników kinetycznych jest bardzo wysoka gęstość mocy oraz niższa niż akumulatory gęstość energii, co oznacza, że tego typu magazyn może być stosowany w horyzoncie czasowym rzędu minut. Okres eksploatacji nie jest ściśle związany z liczbą cykli ładowanie/rozładowanie, co jest dużą zaletą.

W superkondensatorach wykorzystuje się metodę magazynowania energii elektrycznej w polu elektrycznym (jedna z metod pośrednich). Tego typu zasobniki charakteryzują się możliwością bardzo szybkiego ładowania i rozładowania, wysoką sprawnością (85–98%), bardzo wysoką gęstość mocy (2000–10 000 W/kg), wytrzymują głębokie rozładowania oraz charakteryzują się bardzo dużą liczbą dopuszczalnych cykli ładowania/rozładowania (rzędu 500 tys.). Wadą tej technologii zasobników jest mała gęstość energii (5–12 Wh/kg) i znaczny poziom samorozładowania (5%/dzień). Nie mogą być zatem rozpatrywane jako magazyny długoterminowe (Paska 2012).

Właściwości poszczególnych technologii ZE (stosowanych obecnie na poziomie odbiorców energii) z punktu widzenia pracy KSE przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Charakterystyka wybranych technologii rozproszonych zasobników energii z punktu widzenia pracy KSE [13,14] (Paska 2012; Electricity ... 2010)

TABLE 2. Description of the selected technologies of distributed energy storage in terms of the National Power System' operation (Paska 2012; Electricity ... 2010)

Technologia ZE	Zdolność magazynowania energii przez pojedynczą instalację ZE*	Moc pojedynczej instalacji ZE*	Czas oddawania mocy przez pojedynczą instalację ZE*
Akumulatory	do $x \cdot 10^2$ kWh	do $x \cdot 10^1$ kW	do $x \cdot 10^0$ h
Kinetyczne zasobniki energii	do $x \cdot 10^2$ kWh	do $x \cdot 10^2$ kW	do $x \cdot 10^{-1}$ h (min.)
Superkondensatory	do $x \cdot 10^{-1}$ kWh	od $x \cdot 10^0$ kW do $x \cdot 10^2$ kW	do $x \cdot 10^{-2}$ h (sek.)

gdzie: x – liczba naturalna tożsama z pojęciem „kilka”

* Dotyczy poziomu RZE (sieci SN i nn).

Z założenia wszystkie wymienione rodzaje ZE współpracują z przetwornikami energoelektronicznymi oraz układami sterowania i regulacji, co pozwala na bieżące sterowanie i harmonogramowanie ich pracy, tj. ustalanie w pewnych ograniczeniach przedziałów czasu i poziomów ładowania i rozładowania.

Należy podkreślić, że jednostki modułowe ZE mogą być łączone w łańcuchy szeregowo-równoległe. Ograniczenie w tej kwestii stanowi zwykle kubatura pomieszczeń technicznych przeznaczonych na instalację ZE.

1.3. Odbiory sterowalne

Zapotrzebowanie na energię jest podstawową przesłanką do budowy i rozwoju systemów elektroenergetycznych na całym świecie. W ostatnich kilkunastu latach przyjęło się akceptować rozwiązanie, w którym to część odbiorców dobrowolnie (mając określoną korzyść) dostosowuje swoje zapotrzebowanie, na rzecz dostarczenia wymaganej ilości i jakości energii do innych odbiorców.

W zasadzie, rozważa się sterowanie odbiorami w kontekście ograniczania mocy i energii w określonym przedziale czasu. Z kolei zwiększanie obciążenia nawiązuje do grupy zasobników energii, a nie jej konsumpcji.

Można wyróżnić dwie grupy odbiorników: niesterowalne i sterowalne. Pojęcie „niesterowalności” jest pewnym uproszczeniem, w którym zakłada się, że praca odbiorników jest w pewnym sensie istotna dla określonego procesu, np. życiowego, bezpieczeństwa ludzi lub mienia, produkcyjnego, jak również wynika z utrzymania wymaganego poziomu funkcjonalności i komfortu użytkowników. Oczekuje się, aby strategia bieżącego zarządzania energią (np. w budynku) nie miała wpływu na pracę tych urządzeń. Pozostałe odbiorniki uznaje się za sterowalne, w sensie elementu systemu zarządzania zużyciem energii.

Sterowanie odbiornikami może odbywać się w sposób dyskretny (załączanie/wyłączanie napięcia zasilającego przez operowanie łącznikami) lub ciągły (wpływ w określonych granicach na wartość skuteczną napięcia lub jego częstotliwość za pomocą układów transformująco-przekształtnikowych. W procesie sterowania odbiorami może pośredniczyć człowiek, dla którego harmonogramy pracy odbiorników są pewną propozycją (sugestią), na którą może się zgodzić lub nie. Z drugiej strony, sterowanie odbiorami może się odbywać bez aktywności użytkownika (otrzymuje tylko informację).

W lokalnych układach sterowania parametrami wejściowymi mogą być parametry stanu obiektów (np. temperatura, natężenie oświetlenia) lub stany łączników przypisanych do określonych obwodów, przy czym w nadrzędnych układach odpowiedzialnych za zarządzanie energią (ang. *energy management systems* – EMS) można zadawać moc progową, do której dany obiekt sterowania (i tym samym lokalne układy regulacji) powinny się dostosować. Istotną rolę może tu odegrać tzw. internet rzeczy (ang. *internet of things*), czyli idea, wedle której przedmioty, takie jak urządzenia RTV, AGD, urządzenia oświetleniowe i klimatyzacyjne mogą pośrednio albo bezpośrednio gromadzić, przetwarzać lub wymieniać dane za pośrednictwem sieci komputerowej (Wójcicki 2015).

2. Specyfika pracy KSE

Bilansowanie i regulacja mocy i energii w KSE opiera się na tradycyjnym podejściu, tzn. bieżące zapotrzebowanie odbiorców oraz generacja niebędąca w dyspozycji OSP są traktowane jako wymuszenie, natomiast efekt zbilansowania uzyskuje się po stronie podażowej systemu, regulując wytwarzanie. Proces ten odbywa się przy uwzględnieniu udziału poszczególnych podmiotów KSE w określonych segmentach rynku energii.

Zasady prowadzenia ruchu KSE reguluje Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (Instrukcja... 2010; 2011). Zasady te uwzględniają możliwość realizacji kontraktów handlowych w ramach różnych segmentów rynku energii przy jednoczesnym zapewnieniu bezpiecznej pracy KSE (uwzględniającej różnego rodzaju ograniczenia techniczne). Odchylenia wolumenu energii wynikające z różnicy między zawartym kontraktem handlowym a rzeczywistością jej generacją/poborem są rozliczane w ramach rynku bilansującego. Takie odchylenia są spowodowane niedokładnością prognoz dla odbiorów/źródeł niesterowalnych, jak również procesem sterowania określonych jednostek generacji/magazynów/odbiorów przez OSP lub lokalne układy regulacji.

OSP w ramach Bieżącego Planu Koordynacyjnego Dobowego wyznacza punkty pracy (wolumen energii w okresach 15-minutowych) określonej grupy jednostek wytwórczych (jednostki wytwórcze centralnie dysponowane – JWCD), przy zachowaniu odpowiedniego poziomu rezerwy operacyjnej (świadzonej usługi systemowej). Dodatkowo, w zakresie rezerwy interwencyjnej, OSP planuje pracę źródeł o szybkim starcie, zasobników energii (w KSE są to elektrownie wodne szczytowo-pompowe) oraz ograniczenia mocy odbiorów sterowalnych (duże odbiory

przemysłowe lub mniejsze za pośrednictwem agregatora). Przedstawione wyżej sterowanie dyspozytorskie nazywa się w literaturze regulacją trójną (Machowski 2007), a jej rozliczanie odbywa się w ramach rynku bilansującego. Dodatkowe zapewnienie pełnych zdolności regulacyjnych systemu jest realizowane m.in. przez takie środki jak: uruchomienie jednostek wytwórczych, określenie przez OSP sposobu pracy oraz wielkości generacji mocy przez jednostki wytwórcze oraz automatyczna regulacja napięcia i mocy biernej (Instrukcja... 2010; 2011).

Katalog usług systemowych zapewnia także świadczenie przez JWCD usług regulacyjnych w krótkich horyzontach czasowych, tj. (Instrukcja... 2010; 2011):

- ◆ regulacja pierwotna, która opiera się na działaniu regulatorów turbin JWCD przy stałych wartościach mocy zadanych; działanie regulacji pierwotnej jest wymuszone zmianami częstotliwości w SEE, a czas dostarczenia mocy w jej zakresie jest rzędu do kilkudziesięciu sekund (regulacja sekundowa),
- ◆ regulacja wtórna, której zadaniem jest oddziaływanie na wartości zadane mocy regulatorów turbin w JWCD w celu utrzymania określonego poziomu częstotliwości oraz zadanego poziomu mocy wymiany; czas dostarczenia mocy w zakresie regulacji wtórnej jest rzędu kilku minut (regulacja minutowa).

JWCD w ramach JG_{Wa} są zobligowane do świadczenia usług regulacji mocy i częstotliwości. Należności za usługi regulacyjne JG_{Wa} pokrywają koszty zmienne wytwarzania jednostek wielkoskalowych. Tym samym utrudniony jest w sposób konkurencyjny włączenie RZE do tego typu usług. Usługa operacyjnej rezerwy mocy jest również zarezerwowana dla JG_{Wa} (będących JWCD – jednostek wytwórczych przyłączonych do sieci przesyłowej lub koordynowanej sieci 110 kV) (Instrukcja... 2010; 2011).

W zakresie zasobów popytowych OSP dysponuje obecnie usługą redukcji zapotrzebowania na jego polecenie (Instrukcja... 2010). Rozróżnia się dwa modele realizacji usługi: OSP – duży odbiorca lub OSP – podmiot agregujący – mniejsi odbiorcy. Usługa ta ma charakter przeciwwawaryjny i jest świadczona przez podmioty dysponujące możliwością ograniczenia poboru mocy czynnej z sieci, tj. na podstawie sterowalnych odbiorów energii lub źródeł wytwórczych zainstalowanych „za licznikiem”. Czynnikiem aktywującym usługę redukcji zapotrzebowania jest obniżenie dostępnych dla OSP rezerw w KSE. Tym samym aktywacja tej usługi pozwala na zwiększenie dostępnych dla OSP rezerw. Obecny łączny wolumen redukcji do dyspozycji OSP wynosi dla okresu zimowego i letniego po 182 MW.

1 lipca 2014 r. został także wprowadzony przez OSP mechanizm redukcji zapotrzebowania odbiorców w ramach jednostki grafikowej odbiorczej aktywnej (JG_{Oa}) reprezentowanej na rynku bilansującym (RB). Z założenia jest to rozwiązanie rynkowe realizowane poprzez aktywne włączenie się odbiorców w proces kształtowania cen energii na RB. Mechanizm ten powinien prowadzić m.in. do zwiększenia płynności RB, uelastycznienia krzywej zapotrzebowania oraz racjonalizacji cen energii, szczególnie w okresach wysokiego zapotrzebowania. Jednym z najważniejszych wymagań technicznych dla JG_{Oa} jest zapewnienie bezpośredniego sterowania przez OSP urządzeniami/instalacjami odbiorczymi.

Aktualnie nie wykorzystuje się w dużej skali możliwości regulacyjnych na poziomie rozproszonych zasobów energii, zarówno podażowych, jak i popytowych (na poziomie sieci dystry-

bucyjnych SN i nn). Literatura wskazuje, że istnieje duży potencjał techniczny wykorzystania tego typu zasobów, w szczególności w zakresie planowania koordynacyjnego i regulacji trójnej SEE (Ruthe i in. 2012). Barię rozproszenia zasobów rozwiązuje proces ich agregacji. Podmiot, którego jednym z obszarów biznesowych może być świadczenie usług systemowych dla operatorów sieciowych oraz dysponujący zasobami rozproszonymi nazywa się w literaturze wirtualną elektrownią (WE).

3. Potencjalne obszary biznesowe wirtualnej elektrowni

Analiza różnych projektów komercyjnych oraz pilotażowo-badawczych w zakresie WE wskazuje na trzy główne obszary biznesowe (Martin 2009; Pudjianto i in. 2007):

- ◆ wytwarzanie i obrót energią,
- ◆ agregacja handlowo-techniczna w ramach wewnętrznej grupy bilansującej,
- ◆ świadczenie usług sieciowych i systemowych dla OSP i OSD.

3.1. Wytwarzanie i obrót energią

Podmiot gospodarczy będący WE, może być właścicielem lub zarządcą części RZE, takich jak np. elektrownie wiatrowe, systemy fotowoltaiczne, jednostki kogeneracyjne, zasobniki energii). Tym samym, WE może wytwarzać i sprzedawać (kupować, w przypadku koncesji na obrót energią) energię na rynku regulowanym (np. z OZE) lub konkurencyjnym. W zależności od obracanego wolumenu energii, WE (mając umowę przesyłową zawartą z OSP) może być samodzielnym uczestnikiem rynku bilansującego (zgłaszać umowy handlowe za pomocą określonego systemu informatycznego, korzystać z usług operatora handlowo-technicznego – OHT) albo umocować inny podmiot odpowiedzialny za bilansowanie handlowe WE.

3.2. Agregacja handlowo-techniczna w ramach wewnętrznej grupy bilansującej

WE może świadczyć usługę wewnętrznego (w ramach pewnej grupy) bilansowania uczestników rynku energii dysponujących RZE. Grupa taka zgłasza do OSP lub OHT wspólne grafiki handlowe i jest rozliczana z różnic wynikających z rzeczywistego zapotrzebowania/generacji energii. Celem działania grupy bilansującej jest minimalizacja kosztów rozliczeń wynikających z nie-

zbilansowania energii. Jedną ze strategii może być minimalizacja wolumenu. Podstawową zaletą agregacji jest wykorzystanie efektu niejednoczesności występowania niezbilansowania u uczestników grupy i wzajemnego kompensowania błędów prognoz. Zbilansowanie można także osiągnąć wykorzystując RZE mające zdolności regulacji własnego poboru lub generacji (Bućko 2010).

3.3. Świadczenie usług sieciowych i systemowych dla OSP i OSD

Oprócz uczestnictwa WE w rynku energii, rynku bilansującym OSP oraz lokalnym, istnieje techniczna możliwość (biorąc pod uwagę zdolności regulacyjne RZE) wspomagania pracy sieci i systemu elektroenergetycznego w postaci określonych usług. W zależności od skali, struktury oraz rozkładu przestrzennego WE, technicznie możliwe może być świadczenie następujących usług:

- ◆ rezerwa regulacyjna (od sekundowej do godzinowej) w zakresie mocy czynnej – dla OSP,
- ◆ praca wg harmonogramu OSP (w ramach planowania koordynacyjnego),
- ◆ udział w sterowaniu pracą sieci OSD przez regulację napięcia, odciążanie gałęzi (linii lub transformatorów).

Zakres i czas dostępnej mocy czynnej regulacyjnej będzie zależeć od struktury WE. Największe możliwości dają w tym kontekście rozproszone zasobniki energii oraz mikroelektrociepownie. Szczególnym zagadnieniem są także kwestie związane z inercją mocy (w tym sztucznej inercji sterowanej źródłami przyłączonymi przez przekształtniki energoelektroniczne).

WE charakteryzujące się dużymi zasobami magazynowymi mogłyby być harmonogramowane przez OSP w celu przesuwania zapotrzebowania na energię z okresu szczytu na okres doliny, tak jak obecnie pracują elektrownie szczytowo-pompowe.

Oprócz systemowej skali udziału WE, naturalne wydaje się wykorzystanie lokalnego charakteru RZE, przede wszystkim do regulacji pracy sieci dystrybucyjnej. OSD, sterując pracą swojej sieci, może korzystać z usług WE w celu minimalizacji kosztu pokrycia strat mocy i energii, likwidować na bieżąco ograniczenia prądowe i napięciowe w gałęziach i węzłach sieci.

WE może być także świadczeniodawcą usług dla indywidualnych (niewchodzących w strukturę WE) odbiorców (np. drobnego przemysłu, handlowo-usługowych) w zakresie rezerwowego zasilania lub utrzymania określonej jakości napięcia. Istotne jest tutaj sąsiedztwo lokalizacyjne (sieciowe) poszczególnych RZE i potencjalnych usługobiorców.

4. Doświadczenia niemieckie

Już od 2001 r. OSP działający na terenie Niemiec (50Hertz, Amprion, Tennet i Transnet BW) pozyskują usługi rezerwy regulacyjnej mocy (pierwotna, wtórna i trójna) na otwartym i z zało-

żenia transparentnym oraz niedyskryminującym rynku usług systemowych, zgodnie z wytycznymi niemieckiego urzędu regulacyjnego Bundeskartellamt (*Regelleistung ... 2015*). Zamówienia poszczególnych usług systemowych są realizowane w ramach mechanizmu aukcyjnego. Od 2006, oprócz wielkoskalowych jednostek wytwórczych/odbiorczych, usługi rezerwy regulacyjnej świadczą również agregatorzy usług systemowych (rozumiani jako WE). Obecnie (grudzień 2015), zarejestrowano w Niemczech ok. 60 podmiotów agregujących (*Regelleistung... 2015*). Część z działających na rynku usług systemowych WE (10 podmiotów), świadczy pełen zakres usług regulacyjnych od rezerwy sekundowej do minutowej. Wymagania OSP i charakterystykę wybranych usług systemowych dla WE w Niemczech przedstawiono w tabeli 3. Wymagania techniczne są zgodne z europejską instrukcją prowadzenia ruchu sieciowego ENTSO-E (*ENTSO-E... 2015*).

TABELA 3. Charakterystyka i wymagania niemieckich OSP dotyczące usług regulacji częstotliwości i mocy przez elektrownie wirtualne (*Regelleistung... 2015*)

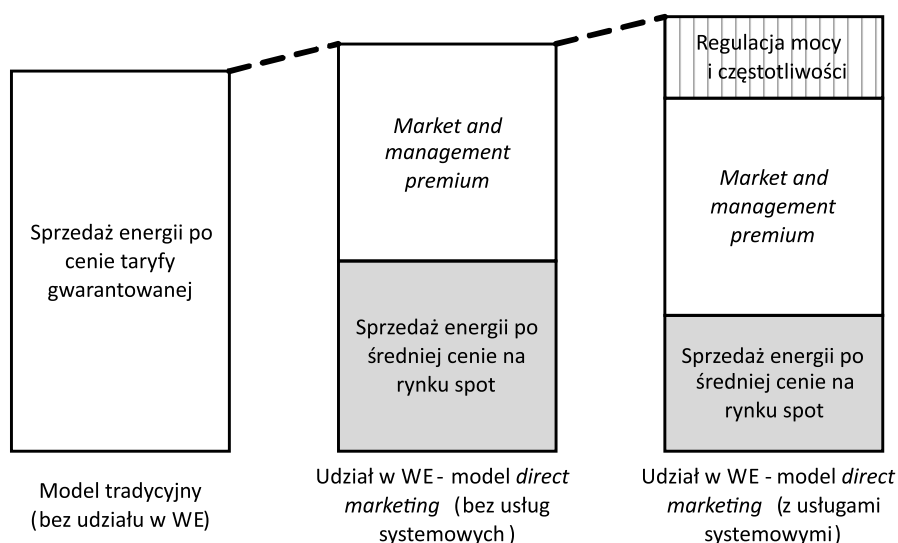
TABLE 3. Description and requirements of German TSO concerning power and frequency control services offered by virtual power plants (*Regelleistung... 2015*)

Parametr regulacji:	Rodzaj regulacji		
	regulacja pierwotna	regulacja wtórna	regulacja trójna
Czas reakcji	< 30 s.	< 5 min.	< 15 min.
Sposób aktywacji	układy automatyki	układy automatyki	układy automatyki lub łączność głosowa
Rodzaj aukcji:	tygodniowe	tygodniowe	dzienne
Czas trwania usługi:	ciągły	2 bloki po 12 h	6 bloków po 4 h
Model wynagrodzenia:	tylko za gotowość	za gotowość i wykonanie	za gotowość i wykonanie
Moc minimalna:	1 MW	5 MW	5 MW
Kierunek regulacji mocą:	przyrost i redukcja (jedna usługa)	przyrost i redukcja (dwie oddzielne usługi)	przyrost i redukcja (dwie oddzielne usługi)

Potencjalni dostawcy usług regulacji mocy i częstotliwości dla OSP muszą przejść odpowiednią procedurę tzw. wstępnej kwalifikacji w celu wykazania ich zdolności do spełnienia wymagań OSP zakresie rezerw regulacyjnych (*TransmissionCode 2007*). Procedura obejmuje nie tylko samego agregatora, ale także wszystkie agregowane jednostki RZE przeznaczone do wspierania określonych usług systemowych. Z tego względu, w struktury WE świadczących usługi regulacyjne wchodzi głównie biogazownie, bloki kogeneracyjne lub małe zbiornikowe elektrownie wodne. Możliwości wykorzystania w usługach systemowych elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych są w dalszym ciągu w fazie badawczej.

WE w Niemczech działają również w obszarze zarządzania rynkowym obrotem energią OZE. Od początku 2012 istnieje w Niemczech możliwość bezpośredniego obrotu (ang. *direct marketing*) na rynkach hurtowych energią wytworzoną w OZE, np. na giełdach EEX lub EPEXSPOT (*Kurztitel... 2014*). Producenci OZE mają możliwość skorzystania z usług pośred-

nictwa spółek obrotu (w tym WE) w sprzedaży energii na rynku przy działającym mechanizmie wsparcia tzw. *market premium*, który zapewnia wyrównanie przychodów jako różnicy między taryfą gwarantowaną (ang. *feed-in tariff*) a średnią miesięczną ceną na rynku spot. Dodatkowo, wprowadzono również dla wytwórców OZE mechanizm wsparcia *management premium* zapewniający pokrycie kosztów obsługi handlu energią (w tym systemy IT). Przykładową względną wielkość i strukturę przychodów właścicieli lub dysponentów RZE, objętych mechanizmami wsparcia (np. OZE) pokazano na rysunku 1. Należy zauważyć, że dodatkowy udział uczestnika WE w rynku usług systemowych (regulacja mocy i częstotliwości) wiąże się z zapewnieniem dla niego większych przychodów. Ryzyko cenowe wynikające z systemu aukcyjnego dla usług systemowych przejmują na siebie zazwyczaj podmioty agregujący, czyli WE.



Rys. 1. Przykładowa struktura przychodu podmiotu OZE będąca/nie będąca elementem wirtualnej elektrowni (w modelu niemieckim)

Fig. 1. Exemplary revenue structure of an entity owning renewable energy sources and being or not an element of virtual power plant

Wnioski

Integracja rozproszonych zasobów energii w strukturze WE ma wysoki potencjał techniczny. Zakładając, że dalszy rozwój energetyki będzie podążał w kierunku orientacji na prosumenta, RZE będą się rozwijać zarówno pod względem ilościowym, jak również jakościowym (coraz lepsze zasoby i parametry z punktu widzenia pracy KSE).

WE będą mogli tworzyć na zasadzie dobrowolności niezależni dysponenti źródeł generacji rozproszonej mikro- i małej skali (w tym OZE), jednostek magazynujących energię oraz stero-

walnych odbiorów. Poszczególne elementy fizyczne WE współpracują ze sobą w logicznych strukturach wzajemnych powiązań integrowanych w środowisku wirtualnym. WE może działać zarówno na rynku energii oraz rynku usług systemowych (w tym np. na rynku mocy). Oprócz świadczenia usług dla OSP lub pośredniczącego agregatora WE może wspomagać pracę sieci dystrybucyjnych świadcząc usługi np. lokalnej regulacji napięcia i mocy biernej lub zarządzania przepustowością gałęzi sieciowych (linii, transformatorów).

Działalność WE wymaga głównie poniesienia określonych nakładów na infrastrukturę IT, jak również oprogramowanie. W zasadzie kwestie techniczne nie stanowią bariery podjęcia tego typu działalności, jednak w dalszym ciągu podnosi się kwestie w obszarze bezpieczeństwa przesyłu informacji.

Przy obecnych relacjach między cenami za energię i usługami systemowymi (na rynku regulowanym oraz rynkach konkurencyjnych), część wytwórcza RZE może rozwijać się wyłącznie w celu sprzedaży energii za cenę gwarantowaną przez ustawodawcę.

Aby zaistniały odpowiednie warunki ekonomiczne do działania WE w ramach świadczenia usług systemowych i sieciowych, działalność taka musiałaby być dodatkowo wspomagana określonym mechanizmem wsparcia. Doświadczenia niemieckie pokazują, że możliwy jest komercyjny rozwój WE, zarówno w obszarze obrotu energią, jak również w zakresie świadczenia usług regulacji częstotliwości i mocy. Pierwszym krokiem w warunkach krajowych (przy obecnych regulacjach) mogłoby być wprowadzenie przez OSP nowej mocowo-regulacyjnej usługi w celu włączenia na zasadach rynkowych obecnych i przyszłych RZE do procesu bilansowania i regulacji mocy i energii w KSE.

Wydaje się słuszne podjęcie badań dotyczących potencjału rozwoju WE w Polsce. Należałoby szczególnie przeanalizować następujące zagadnienia:

- ◆ możliwości i bariery (prawne i ekonomiczne) działania WE w warunkach krajowych,
- ◆ formy rynku usług systemowych i sieciowych dla OSP, OSD oraz indywidualnych odbiorców z udziałem WE,
- ◆ strategię operacyjnego działania WE na rynkach energii i rynku usług operatorskich,
- ◆ techniczne aspekty działania WE w ramach struktury KSE – badania na modelach numerycznych i fizycznych.

Wydaje się, że idea silnej integracji RZE oraz ciągle rozwijającej się technologii *smart grid* może być w obecnych i przyszłych uwarunkowaniach prawnych, rynkowych i społecznych bardzo korzystnym rozwiązaniem.

Zastosowane skróty

RZE	–	rozproszone zasoby energetyczne (ang. <i>distributed energy resources</i>),
GR	–	generacja rozproszona (ang. <i>distributed generation</i>),
ZE	–	zasobniki energii (ang. <i>energy storages</i>),
OS	–	odbiorcy sterowalne (ang. <i>demand response</i>),

OSP	–	operator systemu przesyłowego (ang. <i>transmission system operator</i>),
OSD	–	operator systemu dystrybucyjnego (ang. <i>distribution system operator</i>),
SEE		system elektroenergetyczny (ang. <i>power system</i>),
KSE		Krajowy System Elektroenergetyczny (ang. <i>Polish Power System</i>),
IRiESP	–	Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (ang. <i>Instruction of Transmission System Operation and Maintenance</i>),
OZE	–	odnawialne źródła energii (ang. <i>renewable energy sources</i>),
CHP	–	źródła pracujące w kogeneracji (ang. <i>combined heat and power</i>),
SN	–	sieć średniego napięcia (ang. <i>medium voltage power network</i>),
nn	–	sieć niskiego napięcia (ang. <i>low voltage power network</i>),
EMS	–	system zarządzania energią (ang. <i>energy management system</i>),
RB	–	rynek bilansujący (ang. <i>balancing market</i>),
WE	–	wirtualna elektrownia (ang. <i>virtual power plant</i>),
OHT	–	operator handlowo-techniczny (ang. <i>trade and technical operator</i>).

Literatura

- ASMUS, P. 2010. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future. *The Electricity Journal* t. 23, z. 10, s. 72–82.
- BUĆKO, P. 2010. Usługi bilansowania systemu dystrybucyjnego. *Acta Energetica* z. 2, s. 7–14.
- DIELMANN, K. i VAN DER VELDEN, A. 2003. Virtual power plants (VPP) – a new perspective for energy generation? Modern Techniques and Technologies, MTT. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. IEEE, s. 18–20.
- Electricity... 2010 – Electricity Energy Storage Technology Options. A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits, 2010 Electric Power Research Institute, Inc. [Online] Dostępne w: [https://www.parliament.nsw.gov.au/prod/parlment/committee.nsf/0/7482f370da08bf4eca257a38000982f6/\\$FILE/CSIRO%20attachment%201c%20-%20US%20storage%20economics.PDF](https://www.parliament.nsw.gov.au/prod/parlment/committee.nsf/0/7482f370da08bf4eca257a38000982f6/$FILE/CSIRO%20attachment%201c%20-%20US%20storage%20economics.PDF) [Dostęp: 1.12.2015].
- ENTSO-E... 2015 – ENTSO-E Continental Europe Operation Handbook: A1 – Appendix 1: Load-Frequency Control and Performance. [Online] Dostępne w: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/Pages/default.aspx> [Dostęp: 1.12.2015].
- GUILLE, C. i GROSS, G. 2009. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy policy* t. 37, z. 11, s. 4379–4390.
- Impacts... 2011 – Impacts of Wind Generation Integration, Electric Power Research Institute EPRI, 2011. [Online] Dostępne w: <http://www.uwig.org/epri-1023166.pdf> [Dostęp: 1.12.2015].
- Instrukcja... 2010 – Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Bilansowanie systemu i zarządzanie ograniczeniami systemowymi, Wersja 1.0, zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DPK-4320-1(6)/2010/KS z dnia 23 lipca 2010 r. z późniejszymi zmianami.
- Instrukcja... 2011 – Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. Wersja 2.0, zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DPK-4320-1(4)/2011/LK z dnia 15 grudnia 2011 r. z późniejszymi zmianami.

- Kurztitel... 2014 – Kurztitel Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG. [Online] Dostępne w: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf [Dostęp: 1.12.2015].
- KWIATKOWSKI, M. 2010. Wykorzystywanie technologii magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza w ramach integracji farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* z. 78, s. 115–126.
- MACHOWSKI, J. 2007. Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- MARTIN, B. 2009. Virtual Power Plants in Real Applications-Pilot Demonstrations in Spain and England as part of the European project FENIX, ETG-Fachbericht-Internationaler ETG-Kongress, VDE VERLAG GmbH.
- PAROL i in. 2013 – PAROL, M., BACZYŃSKI, D., KSIĘŻYK, K., PIOTROWSKI, P., WASILEWSKI, J. i WÓJTOWICZ, T. 2013. *Mikrosieci niskiego napięcia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PASKA, J. 2010. *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PASKA, J. 2012. Zasobniki energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym – zastosowania i rozwiązania. *Przegląd Elektrotechniczny* z. 09a, s. 50–56.
- PUDJANTO i in. 2007 – PUDJANTO, D., RAMSAY, C. i STRBAC, G. 2007. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *IET Renewable power generation* t. 1, z. 1, s. 10–16.
- Regelleistung... 2015 – Regelleistung.net, Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung. [Online] Dostępne w: www.regelleistung.net [Dostęp: 1.12.2015].
- Rozp. ... 2007 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623) z późniejszymi zmianami.
- RUTHE i in. 2012 – RUTHE, S., REHTANZ, C. i LEHNHOFF, S. 2012. Towards frequency control with large scale Virtual Power Plants, 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), s. 6.
- SCHULZ i in. 2005 – SCHULZ, C., RODER, G. i KURRAT, M. 2005. Virtual power plants with combined heat and power micro-units, IEEE International Conference on Future Power Systems, s. 5.
- SEKYUNG 2010 – SEKYUNG, H., SOOHEE, H. i SEZAKI, K. 2010. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation. *IEEE Transactions on Smart Grid* t. 1, z. 1, s. 65–72.
- TransmissionCode 2007 – TransmissionCode 2007 Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber Version 1.1, August 2007. [Online] Dostępne w: <https://www.vde.com/de/finn/dokumente/documents/transmissioncode2007.pdf> [Dostęp: 1.12.2015].
- Ustawa... 1997 – Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348) z późniejszymi zmianami.
- Ustawa... 2015 – Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478).
- WÓJCICKI, R. 2015. Internet przedmiotów jako narzędzie wspomagające poprawę efektywności energetycznej w fotowoltaicznych instalacjach prosumenckich *Studia Informatica* t. 36, z. 2, s. 59–72.
- ZIEMS i in. 2012 – ZIEMS, C., MEINKE, S., NOCKE, J., WEBER, H. i HASSEL, E. 2012. Effects of fluctuating wind power and photovoltaic production to the controllability and thermodynamic behaviour of conventional power plants in Germany. Abstract for the research study, Rostock. [Online] Dostępne w: http://www.vgb.org/vgbmultimedia/333_Abtract_final_report-p-5970.pdf [Dostęp: 1.12.2015].

Virtual power plants on power and energy markets – analysis of domestic determinants

Abstract

This paper deals with the potential of distributed energy resources (within the framework of so-called „virtual power plants”) in the context of activity on the market and selected ancillary services for power system and network operators as well. The selected technologies of distributed generation, small energy storage and demand response have been analysed from the point of view of Polish Power System. The basic parameters and features of distributed energy resources have been described such as: power of individual units (energy in case of storage units), connection possibility to larger installations, predictability of operation and potentiality of power control. Next, the specificity of Polish Power System operation has been presented, especially the power system control services demanded by the Polish transmission system operator. The current requirements stated by the Polish transmission system operator have been described as well. It has been pointed to the fact that the potential of power system control by distributed energy resources is not currently utilized, both on the supply and demand side (on the level of medium and low voltage distribution power networks). In further part of the paper, the prospective business areas for activities of virtual power plant have been presented, i.e.: energy production and trading, trade- technical aggregation in the framework of internal balance group and power system control services for power network operators. Both the determinants and examples of commercial activities of the virtual power plants on markets in Germany have been analysed. This could be an indication for the implementation of appropriate regulations in Poland. At the end of paper one can find the summary and conclusions. It has been found that the coupling of ideas such as: renewable energy resources, its aggregation as well as constantly evolving „smart grid” technology can be a very advantageous solution both nowadays and in future legal, market and social conditions. Further research and development concerning virtual power plants activities have been also proposed.

KEYWORDS: virtual power plant, distributed energy resources, ancillary services for power system, distributed generation, energy storage, demand response