

Topologie instalacji hybrydowych OZE wraz ze strategią kontraktowania energii

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd topologii instalacji hybrydowych OZE, możliwych do zastosowania jako alternatywne źródła energii w mikrosieciach i klastrach energii. Omówiono sposoby konfiguracji źródeł hybrydowych, możliwości tworzenia kombinacji danych technologii i ich wykonalność. Oszacowano także profil wytwórczy takiej instalacji dla różnych pór roku. Na podstawie otrzymanych danych zaprojektowano strategię kontraktowania energii elektrycznej, która maksymalizuje wykorzystanie źródeł energii wchodzących w skład instalacji hybrydowej OZE. Następnie oszacowano potencjalne przychody ze sprzedaży energii.

Abstract. The paper presents a review of the topologies of hybrid RES installations, possible to be used as alternative energy sources in microgrids and energy clusters. The methods of configuration of hybrid sources, possibilities of creating combinations of given technologies and their feasibility are discussed. The production profile of such an installation, for different seasons of the year, is also estimated. On the basis of the data received, a strategy of contracting electricity was designed, which maximizes the use of energy sources included in the hybrid RES installation. Then, potential income from the sale of energy from this installation was estimated. (**Topologies of hybrid RES installations with the strategy of contracting energy**).

Słowa kluczowe: hybrydowe instalacje OZE, układy hybrydowe, inteligentne sieci elektroenergetyczne, generacja rozproszona

Keywords: hybrid RES installations, hybrid power systems, smart grids, distributed generation

Wstęp

Obecnie w światowej energetyce dąży się do poszukiwania nowych możliwości w zakresie wytwarzania energii, w szczególności w obszarze energetyki rozproszonej [1]. Pojawia się także trend, by wydzielać niewielkie obszary pracujące jako samobilansujące się podsystemy elektroenergetyczne [1], [2]. Podstawowymi źródłami wytwórczymi w takich systemach najczęściej są jednostki składające się z odnawialnych źródeł energii (OZE) [3]. Do głównych wad źródeł odnawialnych należy niestabilność generacji. Wynika ona głównie ze stochastycznego charakteru dostępności energii pierwotnej dla tych źródeł [6]. W elektrowniach słonecznych ilość produkowanej energii elektrycznej zależy od natężenia promieniowania słonecznego, w elektrowniach wiatrowych od prędkości i kierunku wiatru, w małych elektrowniach wodnych zaś od wielkości przepływu wody [7]. Są to czynniki, na które wytwórca energii nie ma wpływu. Dlatego z punktu widzenia systemów elektroenergetycznych dyspozycyjność tych źródeł, w szczególności w polskich warunkach klimatycznych, pozostawia wiele do życzenia. Aby zachować bezpieczeństwo elektroenergetyczne, należy zapewnić rezerwowanie tych niestabilnych źródeł dodatkowymi źródłami sterowanymi. W ten sposób tworzy się układy hybrydowe [3-5].

Ze względu na politykę energetyczną państw Unii Europejskiej polegającą na zmniejszeniu udziału w miksie energetycznym elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne, predysponowane do współpracy ze źródłami odnawialnymi są technologie wykorzystujące biopaliwa lub gaz ziemny [8]. Możliwe do realizacji kombinacje technologii wytwarzania energii elektrycznej, mogące stanowić dwuźródłowy układ hybrydowy, zostały zestawione na rys. 1 [3-5]. W przypadku gdy dołączamy kolejne źródła energii, aby zachować integralność układu hybrydowego, należy upewnić się, czy ww. źródło nie koliduje z już wykorzystanymi technologiami wytwórczymi.

Obecny stan prawny

Zwiększająca się popularność jednostek wytwórczych w układach kombinowanych (hybrydowych) spowodowała konieczność dostosowania obecnych przepisów w zakresie szeroko rozumianego prawa energetycznego. Nowy podział układów hybrydowych został zawarty w Ustawie z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii wraz z późniejszymi zmianami [9]. Zgodnie z Ustawą wyróżniono dwa rodzaje układów hybrydowych. Pierwszy z nich dotyczy klasycznego układu hybrydowego. Jest to instalacja, w której energia jest wytwarzana zarówno przy udziale odnawialnego źródła energii (OZE), jak i źródeł energii innych niż odnawialne. Drugim rozwiązaniem opisanym w przepisach jest hybrydowa instalacja odnawialnego źródła energii (HIOZE) [9]. Jest to, zgodnie z Ustawą, wyodrębniony zespół urządzeń opisanych przez dane techniczne i handlowe, przyłączonych do tej samej sieci dystrybucyjnej lub przesyłowej o napięciu znamionowym nie wyższym niż 110 kV, w których energia elektryczna jest wytwarzana wyłącznie z odnawialnych źródeł energii, różniących się rodzajem oraz charakterystyką dyspozycyjności wytwarzanej energii elektrycznej. Dodatkowo ww. instalacja musi spełniać następujące warunki [9]:

- żadne z urządzeń wytwórczych nie ma mocy zainstalowanej elektrycznej większej niż 80% łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej tego zespołu,
- urządzenia wytwórcze wchodzące w skład tego zespołu mogą być wyposażone w jeden albo w kilka układów wyprowadzenia mocy, w ramach jednego albo kilku punktów przyłączenia,

Technologia 1/2	Elektrownie PV	Elektrownia wiatrowa	Mikroturbina gazowa (biogaz)	Silnik Stirlinga (biomas)	Mikroturbina gazowa (LNG)	Elektrownia wodna	MCFC	Magazyn energii (LI-on)
Elektrownie PV	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	TAK
Elektrownia wiatrowa	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK
Mikroturbina gazowa (biogaz)	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK
Silnik Stirlinga (biomas)	TAK	NIE	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE
Mikroturbina gazowa (LNG)	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK
Elektrownia wodna	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE
MCFC	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK
Magazyn energii (LI-on)	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	TAK	TAK

Rys. 1. Wykonalność połączenia wybranych technologii wytwarzania energii w układach hybrydowych – na podstawie [3-5]

- łączny stopień wykorzystania mocy zainstalowanej elektrycznej tego zespołu jest większy niż 3504 MWh/MW/rok,
- zespół ten jest zlokalizowany na obszarze jednego powiatu albo nie więcej niż 5 gmin graniczących ze sobą przy czym taki zespół urządzeń wytwórczych może być wspomagany magazynem energii służącym do magazynowania energii wytworzonej z tego zespołu i wówczas oddawana z niego energia jest traktowana jako energia z odnawialnego źródła energii.

Z powyższych definicji można wywnioskować, że największe różnice między ww. układami są uwidocznione w zastosowanych technologiach wytwórczych. Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie [9] układy hybrydowe są układami, w których trzeba zastosować konwencjonalne źródło energii. W hybrydowych instalacjach OZE takiej możliwości nie ma. Co więcej, na hybrydowe instalacje OZE nałożono ograniczenie związane z minimalnym stopniem wykorzystania mocy zainstalowanej elektrycznej. Jest to kluczowe z punktu doboru kombinacji technologii, które posłużą do stworzenia ww. instalacji. Odpowiednie przyporządkowanie takiej instalacji do rodzaju układu hybrydowego będzie determinowało uczestnictwo w wybranym mechanizmie wsparcia finansowego.

Topologie hybrydowych instalacji OZE

Topologia hybrydowych instalacji OZE zależy każdorazowo od użytych technologii źródeł wytwórczych oraz charakteru odbiorów. Może być wykorzystane zasilanie napięciem przemiennym 50 Hz (AC), jak i napięciem stałym (DC). Schematy strukturalne przykładowych topologii instalacji hybrydowych OZE zostały przedstawione na rys. 2 [3-5].

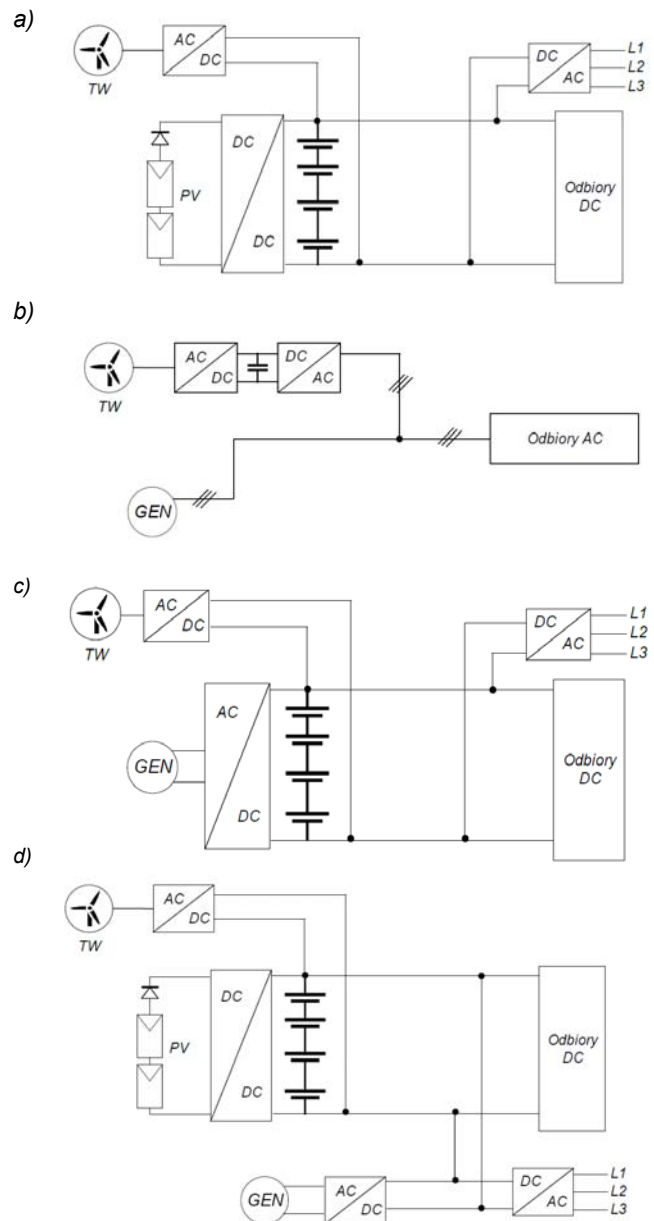
W przypadku przedstawionych topologii można zauważyć pewne wspólne cechy hybrydowych instalacji OZE. Jednym z głównych założeń topologii przedstawionych na rys. 2 jest położenie nacisku na maksymalne wykorzystanie zdolności wytwórczych źródeł niestabilnych. W przypadku gdy w HIOZE występuje układ wyprowadzenia mocy napięciem stałym, można w prosty sposób zastosować baterie akumulatorów do zmagazynowania nadwyżek energii i zapewnienia stabilnych parametrów napięcia DC w HIOZE. Dodatkowo obwód DC pozwala na większe możliwości regulacyjne pracy układu i zoptymalizowanie punktu pracy źródeł niestabilnych. Wykorzystuje się w tym celu przetwornice energoelektroniczne DC/DC typu boost (podwyższające napięcie) lub buck (obniżające napięcie) [3], [13].

Tabela 1. Podstawowe zalety i wady hybrydowych instalacji OZE

Zalety	Wady
Możliwość wykorzystania nadwyżek energii do udziału w mechanizmach rynkowych	Wysokie nakłady inwestycyjne związane z budową źródeł w wielu technologiach wytwarzania energii
Dywersyfikacja OZE pozwala na częściowe zmniejszenie ryzyka związanego z niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi	W przypadku źródeł stabilnych konieczność zapewnienia paliwa (biogaz, biomasa)
Źródło stabilne poprawia dyspozycyjność instalacji	Skomplikowany proces formalno-prawny przyłączania instalacji do SEE
Zmniejszenie kosztów eksploatacji przez zastosowanie inteligentnych rozwiązań SMART GRID	Konieczność posiadania zaawansowanego systemu sterowania i nadzorowania pracy źródeł energii

Wszystkie z omawianych topologii HIOZE, do prawidłowego działania wymagają odpowiednich algorytmów sterujących pracą źródeł [3-5], [12]. Dzięki ich

zastosowaniu można zarządzać rozdziałem energii w sposób optymalny w danej HIOZE. Możliwie jest to przez ograniczenie pracy źródła w niekorzystnych warunkach i zastąpienie jego generacji pracą źródła sterowalnego lub wykorzystaniem energii zgromadzonej w magazynach energii [12].



Rys. 2. Przykłady topologii układów hybrydowych instalacji OZE: a) instalacja składająca się z elektrowni fotowoltaicznej (PV) oraz turbiny wiatrowej (TW). Odbiory zasilane z sieci AC i DC; b) instalacja składająca się z elektrowni wiatrowej oraz mikroinstalacji gazowej, silnika tłokowego, turbiny parowej (wykorzystanie biomasy/biogazu) lub elektrowni wodnej (GEN). Odbiory zasilane z sieci AC; c) instalacja składająca się z elektrowni wiatrowej oraz mikroinstalacji gazowej, silnika tłokowego, turbiny parowej (wykorzystanie biomasy/biogazu) lub elektrowni wodnej (GEN). Odbiory zasilane z sieci AC i DC; d) instalacja składająca się z elektrowni wiatrowej (TW), elektrowni fotowoltaicznej (PV) oraz mikroinstalacji gazowej, silnika tłokowego, turbiny parowej (wykorzystanie biomasy/biogazu) lub elektrowni wodnej (GEN). Odbiory zasilane zarówno z sieci AC, jak i DC. Opracowanie własne na podstawie [3-5], [10-11], [13]

Oszacowanie przychodu ze sprzedaży energii

Wytwórca uzyskuje przychód z dwóch strumieni: sprzedaży energii na giełdzie oraz sprzedaży lub kupna

energii na rynku bilansującym [14]. Niech cena sprzedaży energii na giełdzie w godzinie t będzie oznaczona przez $c_G^S(t)$, a cena sprzedaży lub kupna na rynku bilansującym przez $c_{RB}(t)$. Zatem przychód osiągany przez producenta energii $CI(t)$ w godzinie t określono zależnością:

$$(1) \quad CI(t) = V_G(t) \cdot c_G^S(t) + V_{RB}(t) \cdot c_{RB}(t)$$

gdzie: $V_G(t)$ – wolumen sprzedaży energii na giełdzie w godzinie t , w kWh; $V_{RB}(t)$ – wolumen sprzedaży-kupna energii na rynku bilansującym. Wartość dodatnia wolumenu oznacza sprzedaż energii przez wytwórcę, natomiast ujemna jej kupno, w kWh.

Różnica pomiędzy zakontraktowaną energią a wytworzoną jest przedmiotem gry na rynku bilansującym. Stąd wolumen sprzedaży-kupna energii na rynku bilansującym $V_{RB}(t)$ jest określony następującym wzorem:

$$(2) \quad V_{RB}(t) = V_{GEN}(t) - V_G(t)$$

Jednym ze sposobów kontraktowania jest przyjęcie stałej wartości zakontraktowanej mocy, tzw. kontrakt pasmowy. W takim przypadku wolumen sprzedaży energii $V_G(t)$ byłby równy:

$$(3) \quad V_G(t) = const = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} V_{GEN}(t)$$

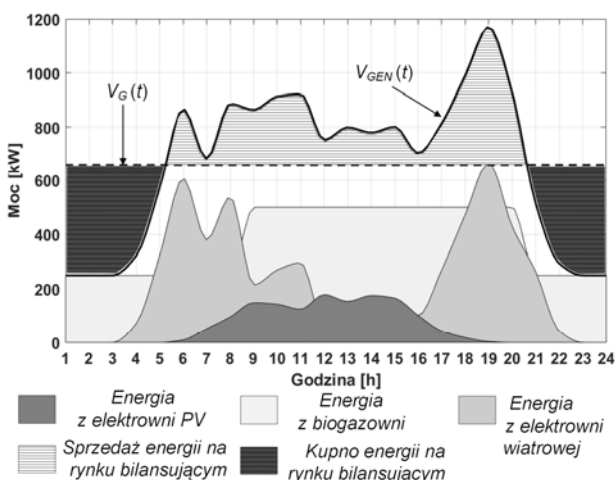
gdzie: $V_{GEN}(t)$ – wolumen produkcji energii przez hybrydową instalację OZE w danej godzinie t , w kWh.

Inną strategią może być próba kontraktowania mocy w poszczególnych godzinach doby, tak aby wolumen sprzedawanej energii był zbliżony do prognozowanej wielkości produkcji energii elektrycznej w hybrydowej instalacji OZE. W ten sposób producent energii jest w stanie zminimalizować ryzyko wynikające z uczestnictwa w rynku bilansującym.

Badania symulacyjne

Przedstawione strategię kontraktowania energii zostały porównane na przykładzie hybrydowej instalacji OZE, która zawiera następujące źródła wytwórcze: elektrownię fotowoltaiczną (PV), elektrownię wiatrową oraz elektrownię biogazową. Ich moce zainstalowane wynoszą odpowiednio:

$$\begin{cases} P_{PV} = 300 \text{ kW} \\ P_{WIATR} = 800 \text{ kW} \\ P_{BIOGAZ} = 500 \text{ kW} \end{cases}$$

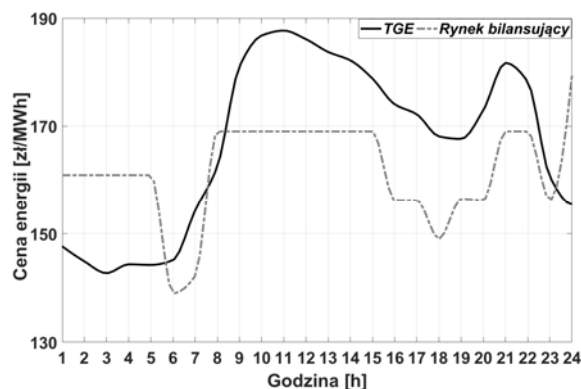


Rys. 3. Profil wytwórczy hybrydowej instalacji OZE wraz z wolumenem kontraktu pasmowego

Struktura analizowanej hybrydowej instalacji OZE odpowiada przedstawionej na rys. 2d. W celu wyznaczenia profilu wytwórczego ww. instalacji posłużono się symulacją warunków pracy, która została wykonana przy użyciu pakietu Homer Energy. Produkcja energii z elektrowni wiatrowej i słonecznej została przyjęta na podstawie warunków klimatycznych panujących w marcu. Dla źródła biogazowego założono pracę z mocą znamionową w godzinach 9:00-20:00, w pozostałych godzinach doby zaś z połową mocy znamionowej. Dobbowe profile wytwórcze dla poszczególnych źródeł i całej instalacji zostały przedstawione na rys. 3.

W badaniach symulacyjnych przyjęto także metodę kontraktowania energii zgodnie ze wzorami (1) – (3). Na rysunku 3 pokazano także średnią wartość dobową spodziewanego profilu wytwórczego $V_G(t)$. Jest ona jednocześnie wartością mocy zakontraktowanej w ciągu całej doby.

Na podstawie rys. 3 można zaobserwować, że znaczący wpływ na wielkość niezbalansowania kontraktu pasmowego ma działanie niestabilnych źródeł odnawialnych, wchodzących w skład hybrydowej instalacji OZE. W godzinach doby, w których występują korzystne warunki wietrzne, wartość zakontraktowanej mocy jest znacząco mniejsza niż możliwości produkcyjne hybrydowej instalacji OZE. Jednakże w godzinach nocnych występują okresy, kiedy wolumen produkcji energii jest mniejszy niż wartość zakontraktowanej mocy. Odchylenia od średniej dobowej wartości wolumenu produkcji są przedmiotem gry na rynku bilansującym. Na bilans finansowy gry na rynku bilansującym składają się okresy, w których ponosi się koszt zakupu energii (godz. 0:00 – 05:00 i 21:00 – 24:00) oraz okresy, w których osiąga się przychód ze sprzedaży energii (godz. 05:00 – 21:00). Na rysunku 4 przedstawiono porównanie cen energii na Towarowej Giełdzie Energii (TGE) i na rynku bilansującym dla przykładowego dnia w marcu 2018 r.

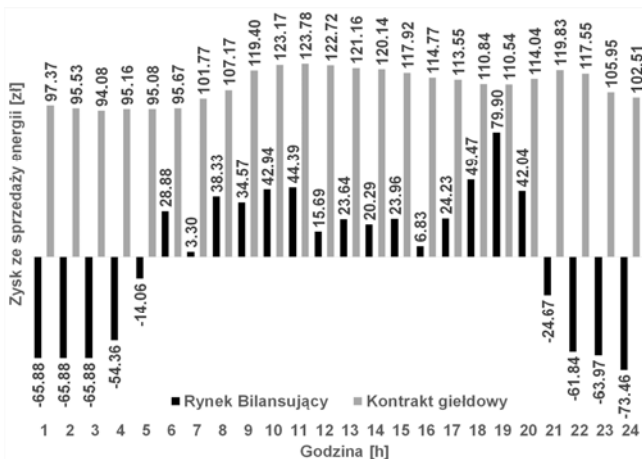


Rys. 4. Ceny energii na rynku bilansującym i TGE dla przykładowego dnia w marcu 2018 r. – na podstawie danych ze stron www.pse.pl oraz www.tge.pl

Na podstawie (1) – (3) oraz cen energii przedstawionych na rys. 4 oszacowano przychód dla analizowanej doby. Na rys. 5 przedstawiono przychód ze sprzedaży energii elektrycznej w ramach kontraktu pasmowego w poszczególnych godzinach doby oraz wartość sprzedanej lub kupionej energii na rynku bilansującym.

Na podstawie obliczeń szacowana wartość przychodu z tytułu sprzedaży energii elektrycznej w ramach kontraktu pasmowego wyniosła **2639,70** zł, a wolumen wyprodukowanej energii wynosił **15827,63** kWh, co oznacza sprzedaż energii ze średnią ceną **166,78** zł/MWh. Na rynku bilansującym sprzedano energię o wartości

478,48 zł i kupiono energię o wartości 490,00 zł. Wolumen energii sprzedanej, jak i kupionej na rynku bilansującym wynosił 2984,58 kWh. W wyniku gry na rynku bilansującym poniesiono stratę w wysokości 11,52 zł. Sumarycznie uzyskano przychód z tytułu sprzedaży energii elektrycznej równy 2628,18 zł. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że w badanym przypadku strategia zawarcia kontraktu pasmowego nie jest korzystna dla wytwórcy energii. Można zauważyć, że poniesiona strata, w wyniku gry na rynku bilansującym, jest stosunkowo niewielka w porównaniu do łącznego przychodu ze sprzedaży energii.



Rys. 5. Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej w ramach kontraktu pasmowego oraz gry na rynku bilansującym

Wnioski

W artykule przedstawiono analizę możliwości uzyskania przychodu z tytułu sprzedaży energii elektrycznej przez wytwórcę posiadającego hybrydową instalację OZE. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dobór odpowiedniej technologii HIOZE jest kluczowy do uzyskania maksymalnego zysku ze sprzedaży energii elektrycznej. Technologie zastosowane w takiej instalacji powinny nawzajem się uzupełniać. W celu zminimalizowania ryzyka związanego z niewykonaniem kontraktu na sprzedaż energii należy rozważyć zainstalowanie jednego źródła stabilnego, np. mikroturbiny zasilanej biogazem. Warto także pamiętać, że przychód z tytułu sprzedaży energii nie będzie zależny tylko od zastosowanych źródeł wytwórczych, ale również od rodzaju zawartego kontraktu. W przedstawionych badaniach posłużono się kontraktem pasmowym, w którym wolumen sprzedanej energii jest stały w okresie jego ważności. Powyższy typ kontraktu ma najlepsze zastosowanie wtedy, gdy profil wytwórczy hybrydowej instalacji OZE utrzymuje się na stałym poziomie przez całą dobę. Dzięki temu zostaje ograniczone ryzyko poniesienia strat, związanych z grą na rynku bilansującym.

Dalsze badania w tym zakresie powinny być skierowane na poszukiwanie takich wartości zakontraktowanej mocy w ciągu poszczególnych godzin doby, aby zmaksymalizować zysk z tytułu sprzedaży energii. Jednocześnie należy zachować bilans energetyczny źródła, czyli ilość wyprodukowanej energii powinna być równa ilości sprzedanej energii do odbiorców. W analizowanym przykładzie nie uwzględniono magazynów energii. Zastosowanie ich w przyszłości może poprawić

elastyczność produkcji energii z hybrydowej instalacji OZE, a także możliwości zawierania kontraktów na sprzedaż energii o mniejszym interwale czasowym. Niemniej jednak można stwierdzić, że hybrydowe instalacje OZE będą stanowić jeden z filarów, w nadchodzącym rozwoju lokalnych systemów elektroenergetycznych (mikrosieci).

Autorzy: prof. dr hab. inż. Józef Paska, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: jozef.paska@ien.pw.edu.pl; dr inż. Mariusz Kłos, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: mariusz.klos@ien.pw.edu.pl; dr inż. Karol Pawlak, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: karol.pawlak@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Krzysztof Zagrajek, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: krzysztof.zagrajek@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Piotr Marchel, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: piotr.marchel@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Magdalena Błędzińska, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: magdalena.bledzinska@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Łukasz Michalski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: lukasz.michalski@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Paweł Terlikowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, E-mail: pawel.terlikowski@ien.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Panapakidis I., Sarafianos D., Alexiadis M., Comparative analysis of different grid-independent hybrid power generation systems for a residential load, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), no. 1, 551-563
- [2] Bhandari B., Lee K., Lee C., Song C., Maskey R., Ahn S., A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources, *Applied Energy*, 133 (2014), 236-432
- [3] Paska J., Biczal P., Kłos M., Hybrid power systems - an effective way of utilizing primary energy sources, *Renewable Energy*, 34 (2009), no. 11, 2414-2421
- [4] Paska J., Michalski Ł., Molik Ł., Kocęba M., Wykorzystanie mikrosieci prądu stałego do integracji rozproszonych źródeł energii, *Rynek Energii*, Nr 2, 2010, ss. 118-123
- [5] Paska J., Generacja rozproszona z wykorzystaniem hybrydowych układów wytwórczych, *Energetyka*, Nr 6, 2013, ss. 457-462
- [6] Li H., Guo S., Ming B., Cheng L., Yang Z., Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization, *Applied Energy*, 238 (2019), 863-875
- [7] Dragutinovic N., Smaragdakis B., Hybrid renewable energy system application for electricity and heat supply of a residential building, *Thermal Science*, 20 (2016), nr 2, 695-706
- [8] European Energy dialogue: «clean Energy for all Europeans» package, *Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny* Bruksela, EESC, 2017
- [9] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478)
- [10] Unamuno E., Barrena J., Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015), 1251-1259,
- [11] Jayasankar V. N., Gururaj M. V., Vinatha U., A study on hybrid Renewable Energy Source interface to the non-ideal grid at distribution level with power quality improvements, *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, 2016, 1-5
- [12] Unamuno E., Barrena J., Hybrid ac/dc microgrids—Part II: Review and classification of control strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015), 1123-1134
- [13] Paska J., Rozproszone źródła energii, Warszawa, OWPW, 2017
- [14] Urbaneck D., Paska J., Pawlak K., Terlikowski P., Kaliński J., Analiza działania rynku bilansującego, *Rynek energii elektrycznej – rozwój, polityka, ekonomia*, Lublin, 2018, 121 - 135