

Mariusz SARNIAK

Politechnika Warszawska Filia w Płocku

 ORCID: 0000-0001-6729-921X

DOI 10.14746/ssp.2025.2.16

Tomasz BRZĄKAŁA

Szkoła Wyższa im. Pawła Włodkowica w Płocku

 ORCID: 0009-0009-3082-8339

Klasyfikacja systemów fotowoltaicznych typu off-grid oraz ich wpływ na współczynniki autokonsumpcji i samowystarczalności instalacji prosumenckich

Streszczenie: W pracy dokonano kompleksowej klasyfikacji systemów fotowoltaicznych typu off-grid na tle aktualnego ogólnego stanu rozwoju technologii fotowoltaicznych w Polsce. Omówiono systemy zarówno będące w pełni autonomiczne jak również te, które wykorzystują sieć elektroenergetyczną lub generatory prądotwórcze jako źródła uzupełniające niekorzystny bilans energii w miesiącach o słabym nasłonecznieniu. Na podstawie danych z przykładowej instalacji prosumenckiej oszacowano wielkość i moc magazynu energii alternatywnego systemu typu off-grid oraz jego wpływ na współczynnik autokonsumpcji. W konkluzji oszacowano optymalny okres w roku kalendarzowym dla klimatu Polski centralnej, w którym możliwe jest uzyskanie samowystarczalności takiego rozwiązania dla określonej mocy szczytowej generatora fotowoltaicznego.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, autokonsumpcja energii, samowystarczalność energetyczna, energetyka prosumencka

Wstęp

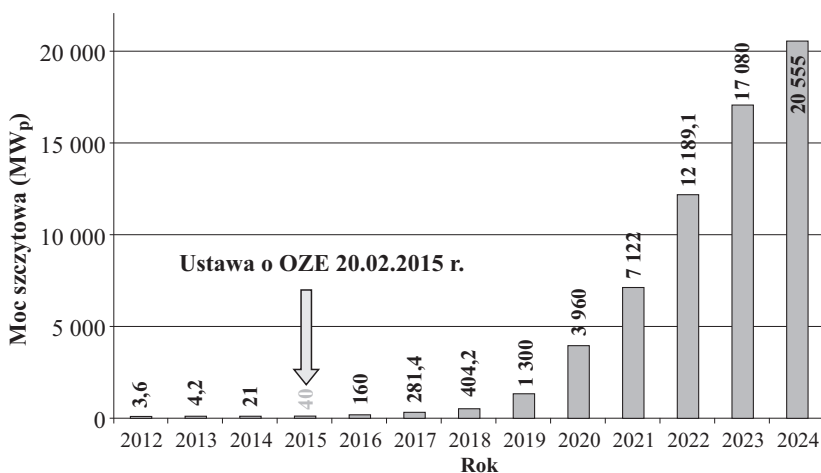
Fotowoltaika (w skrócie PV), najogólniej rzecz ujmując, zajmuje się całokształtem działań, związanych z bezpośrednią konwersją energii promieniowania słonecznego na najbardziej powszechnie użyteczną postać energii – energię elektryczną (Sarniak, 2019). Pomimo braku sta-



Artykuł udostępniany jest na licencji Creative Commons – CC-BY-SA 4.0 – uznanie autorstwa, użycie niekomercyjne, na tych samych warunkach.

bilności uregulowań prawnych w zakresie rozliczeń energii elektrycznej generowanej w instalacjach fotowoltaicznych i wysyłanej do sieci elektroenergetycznej – fotowoltaika w Polsce wciąż dynamicznie się rozwija. Łączna moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce na koniec października 2024 r. wynosiła 20,5 GW_p¹, z czego 18 GW_p stanowią instalacje prosumenckie niezależne, a jedynie 2,5 GW_p instalacje zawodowe (farmy PV, z których największa to Zwartowo o mocy szczytowej 204 MW_p – Respect Energy). W sektorze wszystkich rodzajów OZE fotowoltaika zajmuje 1-sze miejsce z udziałem 62,7% (Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r.). Na wykresie 1 przedstawiono dynamikę wzrostu mocy zainstalowanej fotowoltaiki w Polsce w latach 2012–2024, z której wynika, że nastąpił on dopiero po 2015 roku, po wprowadzeniu ustawy o OZE (Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r.).

Wykres 1. Całkowita moc zainstalowana PV w Polsce w latach 2012–2024 (uwaga: dane z roku 2024 – na koniec października)

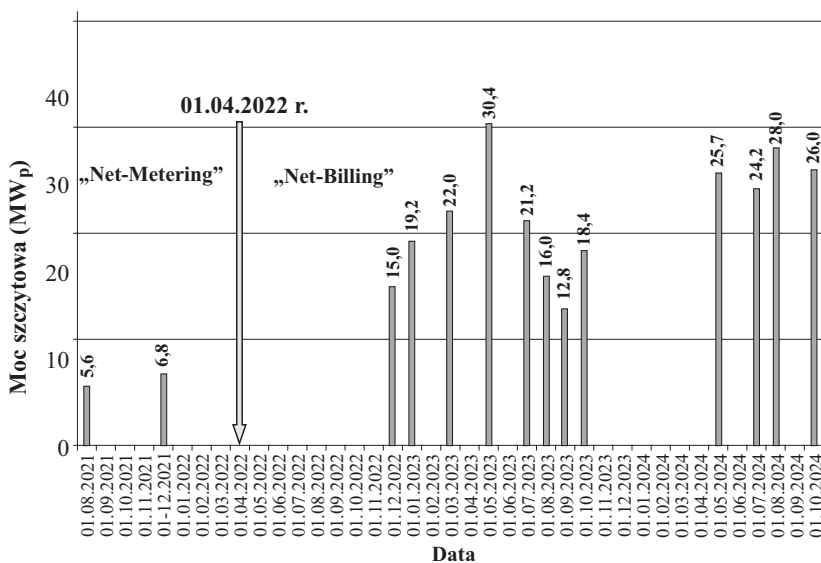


Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z portalu „Rynek Elektryczny”, <https://www.rynekelektryczny.pl>.

Na wykresie 2 pokazano wpływ zmiany sposobu rozliczeń energii oddawanej (wprowadzanej) do sieci elektroenergetycznej z rozliczeń „ilościowych” (Net-Metering) na rozliczenia „wartościowe” (Net-Billing).

¹ Indeks dolny przy jednostce mocy (W_p) oznacza moc szczytową instalacji PV.

Wykres 2: Średnia moc nowych instalacji PV w Polsce w latach 2021–2024 z zaznaczeniem zmiany sposobu rozliczeń prosumentów

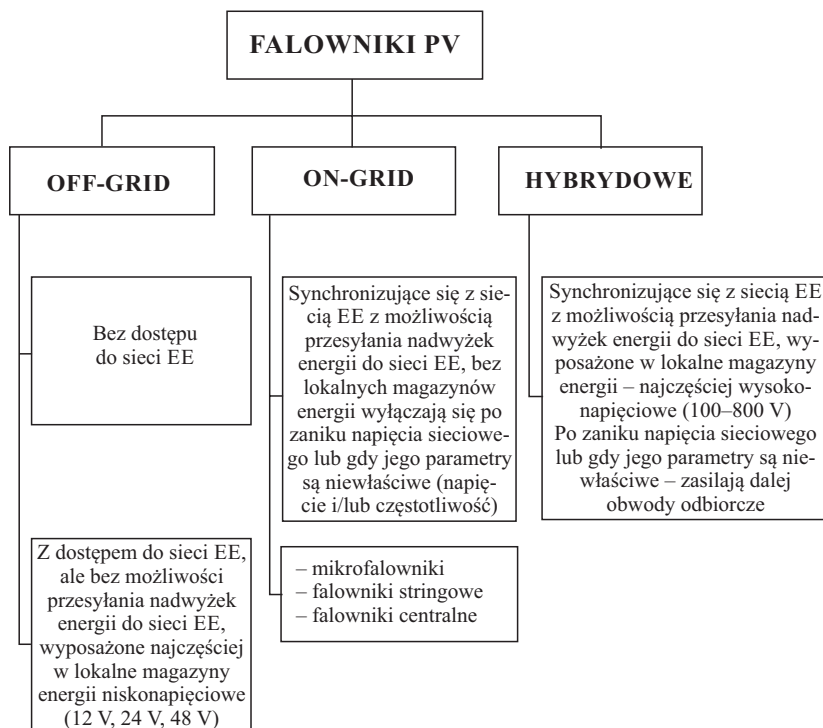


Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z portalu „Rynek Elektryczny”, <https://www.rynekelektryczny.pl>.

Wprowadzenie w roku 2024 dla nowych prosumentów rozliczeń wartościowych dynamicznych, wymusiło stosowanie lokalnych magazynów energii elektrycznej, co jest również preferowane przy różnych mechanizmach wsparcia, np. „Mój prąd 6,0” (*Program*).

Do dnia 1.04.2022 r. (data wprowadzenia systemu rozliczeń Net-Billing) dominowały w Polsce mikroinstalacje PV typu on-grid, w których rolę wirtualnego magazynu energii pełniła sieć elektroenergetyczna. Kluczowym elementem każdego systemu PV jest falownik, który pełni również funkcję systemu zarządzania energią. Na rysunku 1 przedstawiono klasyfikację różnych, najczęściej stosowanych w instalacjach, falowników PV.

Zmiany w sposobie rozliczeń prosumentów oraz dobiegające końca 15-letnie umowy „starych” prosumentów rozliczających się na zasadach opustów (Net-Metering) prawdopodobnie zmieniają dotychczasowy trend i dominującą rolę będą pełniły instalacje tzw. „hybrydowe”, a stare instalacje typu on-grid, będą uzupełniane instalacjami off-grid, które będą przejmowały wydzielone strategiczne obwody instalacji odbiorczych.

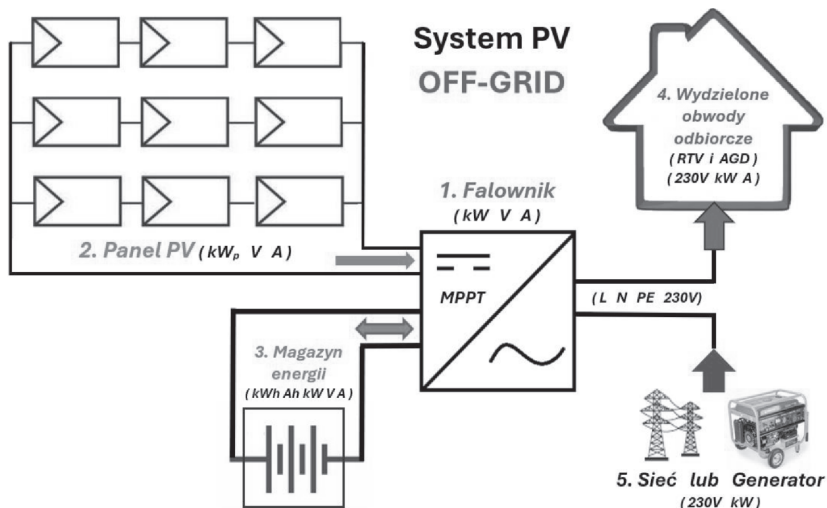


Rys. 1. Klasyfikacja falowników PV wg kryterium sieciowego

Źródło: Opracowanie własne.

Schemat takiego rozwiązania alternatywnego przedstawiono na rysunku 2. Na przedstawionym schemacie wyróżniono pięć elementów: (1) falownik PV typu off-grid, (2) panel PV, (3) magazyn energii, (4) obwody odbiorcze oraz (5) alternatywne źródło energii elektrycznej. Kluczowa rola falownika PV polega na tym, że determinuje on parametry pozostałych elementów.

W instalacjach PV typu off-grid istotnym parametrem jest moc wyjściowa (w kW), a nie jedynie pojemność magazynu energii (w kWh). Zagadnienie komplikuje się znacząco, gdy chcemy zbudować system trójfazowy większej mocy. Dążenie do pełnej samowystarczalności energetycznej przy wykorzystaniu systemu PV typu off-grid jest obecnie nieuzasadnione ekonomicznie tam, gdzie jest dostępna sieć elektroenergetyczna.



Rys. 2. Schemat ideowy instalacji PV typu off-grid

Źródło: Opracowanie własne.

Metodyka badań

W pracy przeanalizowano dane z monitoringu mikroinstalacji PV typu on-grid o mocy szczytowej 4,26 kW_p (*Sunny...*), którą doposażono w ostatnim okresie (od sierpnia do grudnia roku 2024) w dodatkowy podsystem off-grid o mocy szczytowej 2,52 kW_p do zasilania strategicznych obwodów budynku jednorodzinne takich, jak: obwód oświetlenia budynku, obwód zasilania lodówki, bram automatycznych, alarmu z monitoringiem wizyjnym oraz pieca gazowego kondensacyjnego. Dodatkowo należy zaznaczyć, że dodany system PV typu off-grid ma ograniczoną łączną moc wyjściową do 3 kW i pojemność niskonapięciowego (25,6 V) magazynu energii równą 5,12 kWh, wykonanego w technologii LiFePO₄.

Innym źródłem danych do analizy były zarejestrowane ilości energii pobranej i oddanej z/do sieci elektroenergetycznej, zarejestrowane przez licznik zdalnego odczytu operatora sieci dystrybucyjnej (OSD).

Przyjęto metodę obliczania współczynnika samowystarczalności *SSR* (*ang. Self-Sufficiency Ratio*) dla instalacji PV wg następującego wzoru:

$$SSR = \frac{E_{PV} - E_{OS}}{E_{ZW} + E_{PS}} = \frac{E_{ZW}}{E_{ZC}}$$

gdzie (poszczególne składniki energii zaznaczono na rysunku 3):

E_{PV} – energia wygenerowana przez system PV w (kWh);

E_{ps} – energia pobrana z sieci operatora OSD w (kWh);

E_{os} – energia z systemu PV oddana do sieci operatora OSD w (kWh);

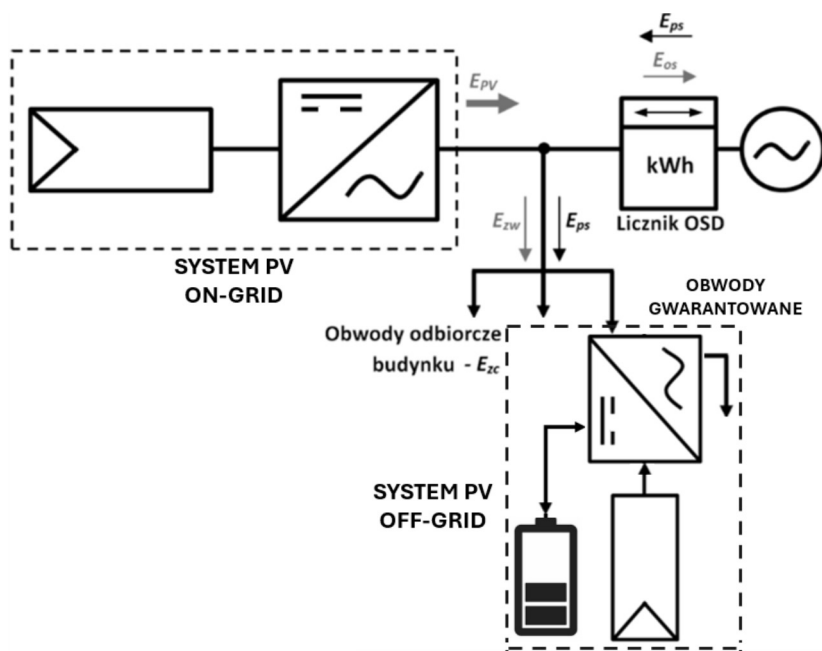
E_{zw} – energia wygenerowana przez system PV i zużyta na potrzeby własne (stanowi ona różnicę: $E_{PV} - E_{os}$) w (kWh);

E_{zc} – całkowite zużycie energii przez obwody odbiorcze budynku ($E_{zc} = E_{zw} + E_{ps}$) w (kWh).

Z kolei współczynnik autokonsumpcji *SCR* (ang. *Self-Consumption Ratio*) energii wygenerowanej w systemie PV obliczamy ze wzoru:

$$SCR = \frac{E_{PV} - E_{OS}}{E_{PV}} = \frac{E_{ZW}}{E_{PV}}$$

Oba współczynniki (*SSR* i *SCR*) jako stosunki ilości odpowiednich składników energii są bezwymiarowe i zwyczajowo podawane są w pro-



Rys. 3. Schemat przepływów energii elektrycznej w klasycznym systemie PV typu on-grid z wydzielonymi obwodami zasilanymi z podsystemu PV typu off-grid

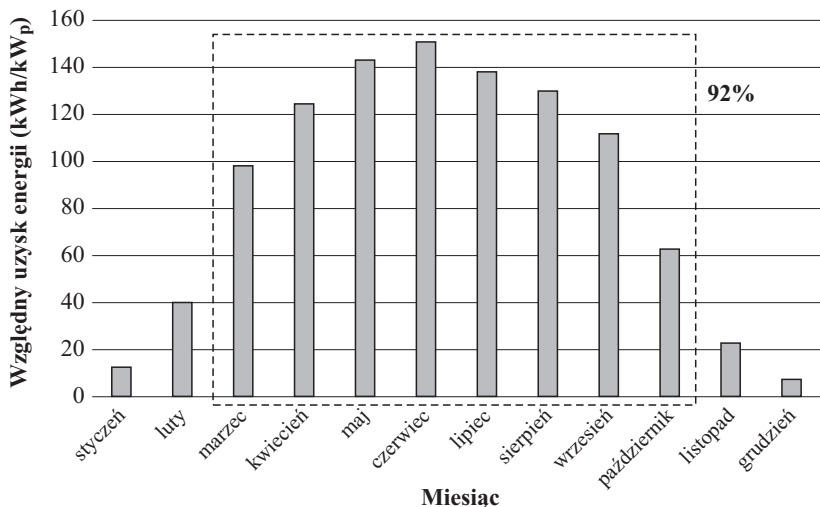
Źródło: Opracowanie własne.

centach. Na wzrost wartości tych współczynników istotnie wpływa fakt zużywania na potrzeby własne jak największej ilości energii generowanej przez system PV. Na wzrost współczynnika samowystarczalności wpływa również zmniejszanie ilości energii pobieranej z sieci elektroenergetycznej. Przyjęta metoda jest przydatna do analiz jedynie wtedy, gdy całkowicie wykorzystywana jest energia generowana przez system PV, czyli jest zużywana w obwodach odbiorczych lub jest oddawana do sieci operatora.

Wyniki badań

Na wykresie 3 przedstawiono średnie względne miesięczne uzyski energii z systemu PV typu on-grid o mocy szczytowej $4,26 \text{ kW}_p$ w latach 2020–2023, a więc przed zainstalowaniem dodatkowego podsystemu PV typu off-grid. Średni roczny względny uzysk energii dla rozpatrywanego systemu wyniósł 1044 kWh/kW_p , co w konfrontacji z szacunkami Polskiego Towarzystwa Fotowoltaiki dla najbliższej lokalizacji dla miasta

Wykres 3. Względne średnie miesięczne uzyski energii z systemu PV typu on-grid o mocy szczytowej $4,26 \text{ kW}_p$ w latach 2020–2023



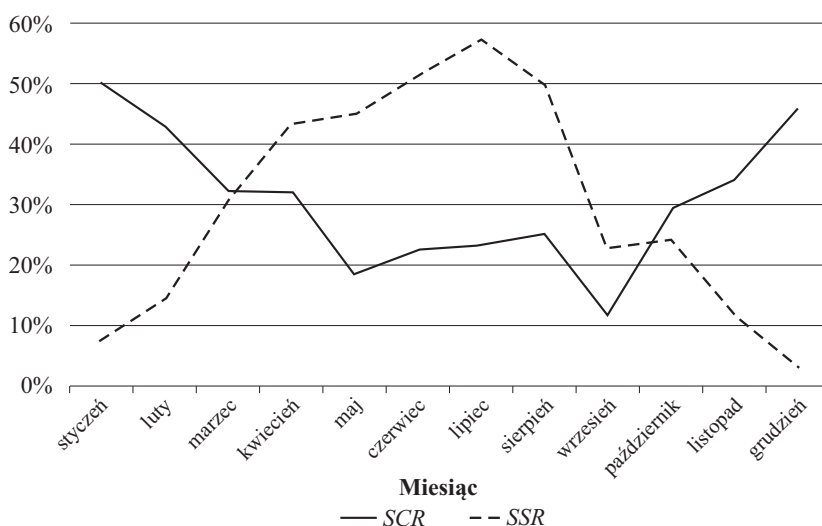
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z Sunny Portal, <https://ennexos.sunnyportal.com>.

Płocka na średnim poziomie 1037 kWh/kW_p (*Oszacowanie...*) należy uznać za wynik zadawalający. Przedstawienie wyników w wartościach względnych umożliwia porównywanie uzyskiwanych wyników niezależnie od wielkości instalacji PV. Szacunki Polskiego Towarzystwa Fotowoltaiki są określane dla optymalnej orientacji generatora PV.

Duże różnice w ilości generowanej energii w poszczególnych miesiącach roku są charakterystyczne dla rozpatrywanej lokalizacji i decydują o tym, że nie można fotowoltaiki traktować jako całorocznego stabilnego i przewidywalnego źródła energii. Bardzo trudne jest prawidłowe oszacowanie ilości energii, jaka będzie wygenerowana w systemach PV na obszarze całego kraju. Wymaga to znajomości dokładnych prognoz warunków pogodowych zarówno w zakresie natężenia promieniowania słonecznego, jak i temperatury.

Na wykresie 4 przedstawiono uśrednione miesięczne współczynniki autokonsumpcji (*SCR*) oraz samowystarczalności (*SSR*) dla instalacji on-grid oszacowane w latach 2022–2023 (różnica czasowa w zakresie analizowanych danych wynika z dostępności danych z licznika zdalnego odczytu operatora OSD). Średnia dobową ilość energii oddawanej do sieci

Wykres 4. Uśrednione miesięczne współczynniki autokonsumpcji (*SCR*) oraz samowystarczalności (*SSR*) dla instalacji PV typu on-grid oszacowane w latach 2022–2023

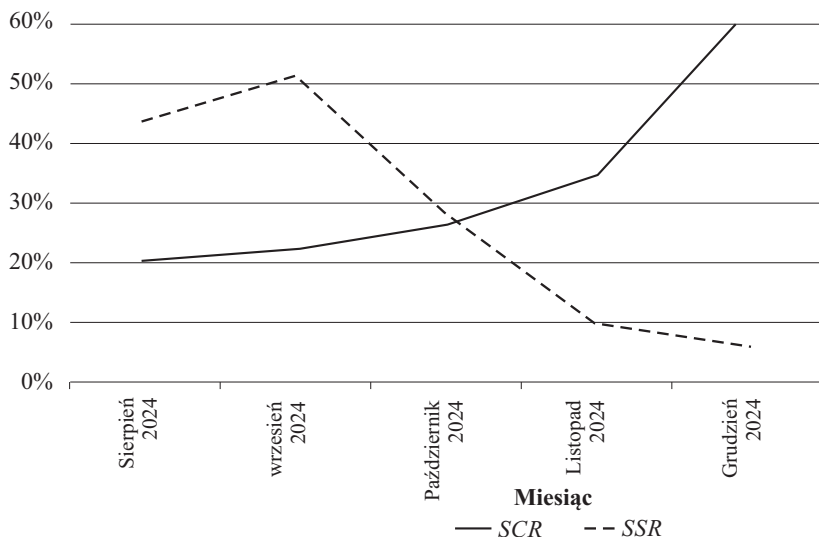


Źródło: Opracowanie własne.

elektroenergetycznej w miesiącach od marca do października, w których generowane jest przeciętnie ponad 92% (wykres 3) całorocznej energii, wynosiła 12 kWh.

Na wykresie 5 przedstawiono z kolei uśrednione miesięczne współczynniki autokonsumpcji (*SCR*) oraz samowystarczalności (*SSR*) dla zmodyfikowanej instalacji PV, przedstawionej na rysunku 3 w okresie od sierpnia do grudnia roku 2024.

Wykres 5. Uśrednione miesięczne współczynniki autokonsumpcji (*SCR*) oraz samowystarczalności (*SSR*) dla zmodyfikowanej instalacji PV, przedstawionej na rysunku nr 5 w okresie od sierpnia do grudnia roku 2024



Źródło: Opracowanie własne.

W podsystemie PV typu off-grid w miesiącach od sierpnia do października 2024 roku była 100% autokonsumpcja i samowystarczalność, a w miesiącach od listopada do grudnia 2024 roku – pobierana była energia z sieci elektroenergetycznej, gdyż generacja PV była zbyt niska, aby zapewnić ciągłość zasilania strategicznym obwodom budynku. Energia pobierana przez podsystem PV typu off-grid potencjalnie była energią pobieraną z sieci lub/i energią wygenerowaną w systemie PV typu on-grid, co dodatkowo komplikuje dokładną analizę tego studium przypadku.

Wnioski

Dynamiczny rozwój fotowoltaiki w Polsce rozpoczął się dopiero po uchwaleniu ustawy o OZE w 2015 roku, wcześniej technologia ta była nieistotna z punktu widzenia funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Zmiana sposobu rozliczeń prosumentów w roku 2022 z rozliczeń „ilościowych” (Net-Metering) na rozliczenia „wartościowe” (Net-Billing) spowodowała ponad trzykrotny wzrost średniej mocy instalowanych mikroinstalacji PV z ok. 6,2 kW_p do ok. 21,6 kW_p, co niekorzystnie wpłynęło na funkcjonowanie sieci elektroenergetycznych w Polsce. Duże nasycenie fotowoltaiką terenowych linii elektroenergetycznych skutkuje częstymi wyłączeniami instalacji PV z powodu zbyt wysokiego napięcia (gdy przekracza ono 253 V na fazę). Wprowadzenie rozliczeń dynamicznych i upowszechnienie lokalnych magazynów energii elektrycznej jest działaniem mającym na celu stabilizację parametrów jakościowych sieci elektroenergetycznej.

Długookresowe obserwacje systemu PV typu on-grid wykazały, że średnio w miesiącach od marca do października uzyskuje się ponad 92% całorocznej ilości generowanej energii. Jest to bardzo duży problem przy projektowaniu systemów PV typu off-grid, które w krytycznych miesiącach, czyli od listopada do lutego mogą jedynie funkcjonować w trybie zasilania awaryjnego typu UPS.

Współczynniki autokonsumpcji (SCR) i samowystarczalności (SSR) rozpatrywanej instalacji PV typu on-grid średniorocznie wynosiły ok. 30%. Po rozbudowie systemu PV o dodatkowy podsystem typu off-grid rozpatrywane wskaźniki zmieniły się nieznacznie o ok. $\pm 3\%$. Jest to spowodowane tym, że system PV typu off-grid podczas korzystnych warunków do generacji energii, po zapełnieniu magazynu energii i przy braku zapotrzebowania na energię w obwodach odbiorczych przechodzi w stan pracy jałowej, gdyż nie ma możliwości oddawania energii do sieci elektroenergetycznej. Z kolei w miesiącach niekorzystnych (w rozpatrywanym okresie w listopadzie i grudniu 2024 roku) system PV typu off-grid nie jest w stanie zasilac w sposób ciągły wydzielonych strategicznych obwodów bez pobierania energii z sieci elektroenergetycznej.

Z przeprowadzonej analizy danych wynika, że korzystniejszym rozwiązaniem od zastosowanego systemu PV typu off-grid byłoby zastosowanie falownika hybrydowego z magazynem energii o pojemności co najmniej 12 kWh, czyli ilości energii porównywalnej z tą, która jest oddawana do sieci elektroenergetycznej.

Bardziej precyzyjne analizy systemów PV typu off-grid będą możliwe po kompleksowym opomiarowaniu wszystkich wewnętrznych przepływów energii. W tego typu systemach złożonym i trudnym zagadnieniem jest kompleksowe zarządzanie energią według określonych kryteriów. W okresach o małym nasłonecznieniu autokonsumpcja i samowystarczalność mogą być celami wzajemnie się wykluczającymi.

Zagadnieniem wymagającym dalszych badań i analiz jest ustalenie optymalnych parametrów pracy falowników PV typu off-grid w lokalnych warunkach klimatycznych. Duża liczba opcji funkcjonowania tego typu falowników oraz metody ich komunikacji z magazynami energii stanowią poważne wyzwanie dla użytkowników w zmieniających się warunkach klimatycznych.

Interesy konkurencyjne:

Autor oświadczył, że nie istnieje konflikt interesów.

Competing interests:

The author has declared that no competing interests exists.

Wkład autorów

Konceptualizacja: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Analiza formalna: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Metodologia: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Opracowanie artykułu – projekt, przegląd i redakcja: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Authors contributions

Conceptualization: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Formal analysis: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Methodology: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Writing – original draft, review and editing: Mariusz Sarniak, Tomasz Brząkała

Bibliografia

- Cieślik S. (2016), *Wpływ mikroinstalacji prosumenckich na zużycie energii przez odbiorniki*, „Elektro.Info”, nr 1–2.
- Dołęga W. (2023), *Krajowa sieć elektroenergetyczna – analiza stanu i zagrożeń funkcjonowania*, „Rynek Energii”, nr 3(166).

- Kalogirou S. (2017), *McEvoy's Handbook of Photovoltaics – Third Edition*, Academic Press, Limassol.
- Moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce AKTUALIZACJA, <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce>, 7.01.2025.
- Oszacowanie uzysku energetycznego systemu fotowoltaicznego – Polskie Towarzystwo Fotowoltaiki, <http://pv.home.pl/pv-pl/wp-content/uploads/2013/04/Poland-naslonecznienie-PV-Poland.pdf>, 9.01.2025.
- Program Mój Prąd, <https://mojprad.gov.pl>, 9.01.2025.
- Quoilin S., Kavvadias K., Mercier A., Pappone I., Zucker A. (2016), *Quantifying Self-Consumption Linked to Solar Home Battery Systems: Statistical Analysis and Economic Assessment*, „Applied Energy”, nr 182, s. 58–67, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.077>.
- Rybiński M., Dzierwa P., Kowalczyk S., Kamińska K. (2023), *Wyzwania stojące przed bilansowaniem energii elektrycznej w związku ze zmianami w polskim mixie energetycznym*, „Rynek Energii”, nr 5(168).
- Sarniak M. (2020), *Researches of the Impact of the Nominal Power Ratio and Environmental Conditions on the Efficiency of the Photovoltaic System: A Case Study for Poland in Central Europe*, „Sustainability”, nr 12, 6162, <https://doi.org/10.3390/su12156162>.
- Sarniak M. (2019), *Systemy fotowoltaiczne*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
- Sawczyszyn A., Kopczewski M. (2020), *Wizja polityki energetycznej Polski do 2040 roku*, w: *W kierunku nowej polityki energetycznej*, tom 1: OZE – zrównoważony rozwój – ochrona środowiska – logistyka – ekonomia, red. P. Kwiatkiewicz, Wydawnictwo UZ, Poznań–Zielona Góra.
- Sunny Portal – SMA Solar Technology AG, <https://ennexos.sunnyportal.com>, 9.01.2025.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. 2015, poz. 478.

Classification Of Off-Grid Photovoltaic Systems and Their Impact on the Self-Consumption and Self-Sufficiency Rates of Prosumer Installations

Summary

The paper presents a comprehensive classification of off-grid photovoltaic systems against the current general state of photovoltaic technology development in Poland. It discusses systems that are fully autonomous as well as those that use the electricity grid or power generators as sources to supplement the unfavourable energy balance in months of low sunshine. Based on data from an example prosumer installation, the size and power of the energy storage of an alternative off-grid system and its impact on the self-consumption factor were estimated. In conclusion, the optimum

period in a calendar year for the climate of central Poland, in which it is possible to achieve self-consumption of such a solution for a given peak power of a photovoltaic generator, was estimated.

Key words: photovoltaics, energy self-consumption, energy self-sufficiency, prosumer Energy

