

Wpływ źródła OZE na charakterystykę elektroenergetyczną zakładu przetwórczego

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały doświadczenia zespołu B+R realizującego projekt NCBiR zat. „Opracowanie i wdrożenie systemu zarządzania energią z wykorzystaniem OZE w obszarze technologii wrażliwych na ciągłość zasilania”. Zaprezentowano wnioski po pierwszym roku użytkowania farmy fotowoltaicznej o mocy 1,16 MW w zakładzie przetwórczym branży spożywczej o mocy zapotrzebowanej 5 MW.

Abstract. There will be presented some experiences of the R&D team implementing the NCBiR project titled: "Development and implementation of an energy management system using renewable energy sources in the area of technologies sensitive to power supply continuity." We will present conclusions after the first year of use of a photovoltaic farm with a capacity of 1.16 MW in a food processing plant with a required capacity of 5 MW (The impact of a renewable energy source on the power energy characteristic of a processing plant).

Słowa kluczowe: fotowoltaika autokonsumencka, elastyczność popytowa, DSR, model trybów zasilania.

Keywords: self consumption photovoltaic systems, demand side flexibility, DSR, power mode model.

Wstęp

Obserwowany od kilku lat wzrost kosztów użytkowania mediów energetycznych skłania niejednego przedsiębiorcę do inwestycji w budowę własnych źródeł energii – z uwagi na dostępność technologii jak i potencjalnie możliwe do wykorzystania powierzchnie posiadanych budynków przemysłowych lub/i niezagospodarowanego terenu przyzakładowego – wybór często pada na farmę fotowoltaiczną. Czy jednak nakłady na budowę własnego źródła OZE i wybór wskaźnika ROI (ang. return of investment) jest jedynym istotnym kryterium decyzyjnym? Naturalnym jest, że przedsiębiorca chce skupić się przede wszystkim na tym co potrafi robić najlepiej, tj. na swoim biznesie. W zakładzie przetwórczym cała uwaga zespołu przedsiębiorcy jest skupiona na optymalizacji procesów produkcji wyrobów, stabilizacji pracy linii technologicznych i zapewnienia stanów magazynowych wymaganych dla obsłużenia potrzeb rynku. Klient jest najważniejszy, a więc i produkcja jest najważniejsza. Wprowadzenie dodatkowego ryzyka, wynikającego z eksploatacji niestabilnego źródła OZE, a wpływającego na stabilność zasilania linii produkcyjnych jest nieakceptowalna.

Jak zatem złagodzić wpływ niestabilnej pracy farmy fotowoltaicznej oraz utrzymać stabilne warunki pracy technologii wrażliwej na ciągłość zasilania? Tę tezę badawczą podjęto w projekcie NCBiR nr POIR.01.01.01-00-2168/20, zatytułowanym: „Opracowanie i wdrożenie systemu zarządzania energią z wykorzystaniem OZE w obszarze technologii wrażliwych na ciągłość zasilania”, zrealizowanym w latach 2021 – 2023.

W niniejszym raporcie autorzy, członkowie zespołu B+R w/w projektu, dzielą się uwagami z wprowadzenia instalacji fotowoltaicznej o mocy 1,16 MW do zakładu przetwórstwa spożywczego, jak również wskazują na główne wyzwania determinujące warunki stabilnej eksploatacji takiego źródła.

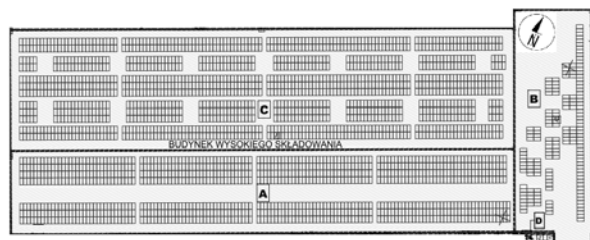
Parametry źródła OZE oraz sieci elektroenergetycznej zakładu

Farma fotowoltaiczna o mocy znamionowej 1160,1 kW posadowiona jest na trzech dachach magazynu wysokiego składu (rys. 1), ta lokalizacja oraz wymiary geometryczne budynku zdeterminowały założenia projektowe i wybór finalnie zrealizowanego rozwiązania. Farma OZE-PV to łącznie 2578 szt. modułów fotowoltaicznych (odpowiednio: A – 938 szt.; B – 178 szt.; C – 1464 szt.) o mocy

znamionowej 450 Wp, które połączono szeregowo w 16-32 moduły na string, łącznie 162 stringi podłączone do 11 falowników o mocy 50-100 kW. Ma to istotny wpływ na stopniową redukcję wytwarzanej mocy w korelacji ze strażnikiem jej zerowego wpływu do sieci OSD, szerzej omówionym w dalszej części raportu.

Moduły zamontowano równolegle do istniejących połączy dachów, przy czym:

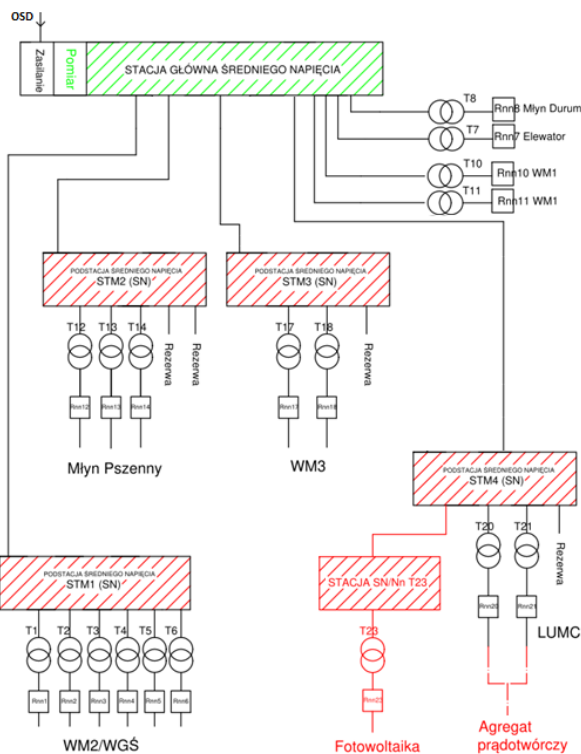
- powierzchnia generatora PV-A wynosi 2072,2 m², orientacja południowy-wschód 155°, kąt nachylenia 3°;
- powierzchnia generatora PV-B wynosi 391 m², orientacja północny-wschód 65°, kąt nachylenia 4°;
- powierzchnia generatora PV-C wynosi 3232,0 m², orientacja południowy-wschód 155°, kąt nachylenia 3°.



Rys.1. Połączenie dachowe obiektu z oznaczoną lokalizacją poszczególnych modułów fotowoltaicznych

Takie ustawienie paneli wskazuje na znaczne odchylenie od wartości kąta optymalnego: 35,3° (wyznaczony za [1], dla szerokości geograficznej: 51°22'18"N - właściwej dla lokalizacji budynku) – co rodzi czasem pytanie o taki wybór projektu. Tu licząc roczny uzysk energii dla pojedynczego modułu fotowoltaicznego, ułożenie go z płaszczyzną dachu wiąże się ze stratą 10,2% (wyznaczony za [2]). Należy jednak zwrócić uwagę na upakowanie paneli w płaszczyznach poszczególnych połączy (rys. 1), ustawienie paneli pod kątem 35,3° wymagałoby rozsunięcia poszczególnych rzędów – dla uniknięcia wzajemnego zacielenia – co ograniczyłoby ich liczbę do 2168 (zmniejszenie mocy zainstalowanej o 15,9%). Stosując montaż w płaszczyźnie dachu uzyskano maksymalizację mocy zainstalowanej na dostępnej powierzchni, jednocześnie zwiększając efektywnie roczny uzysk energii elektrycznej wytworzonej ze źródła o 5,7%. Dodatkowo nieoczywistą zaletą takiego rozwiązania jest

możliwość zastosowania robotów myjących dla utrzymania wymaganej czystości powierzchni roboczej farmy [3]. Energia pochodząca z instalacji fotowoltaicznej jest wykorzystana na potrzeby własne obiektu. Instalacja wyposażona została w dedykowany System Zarządzania Energią – SCADA_ML, stację pogodową oraz system zabezpieczenia przed wpływem energii do sieci OSD.



Rys.2. Wewnętrzna sieć elektroenergetyczna

Zakład przetwórczy posiada jedno przyłącze do sieci OSD na średnim napięciu 15 kV (stacja główna, rys. 2). Po stronie wtórnej układu pomiarowego rozmieszczona jest wewnątrz zakładowa sieć elektroenergetyczna, w skład której wchodzi: cztery podstacje średniego napięcia (STM1÷4), jedna stacja średniego napięcia (T23) dedykowana do obsługi źródła fotowoltaicznego, podłączonego do sieci średniego napięcia poprzez transformator 1,6 kVA (T23) i rozdzielnię niskich napięć (Rnn23). W poszczególnych podstacjach STM rozlokowanych jest łącznie siedemnaście transformatorów zasilających rozdzielnie niskich napięć zlokalizowane na poszczególnych obiektach i wydziałach produkcyjnych zakładu. Takie rozwiązanie pozwala na:

- pełne wykorzystanie mocy generowanej przez źródło fotowoltaiczne – moc generowana na jednym obiekcie jest wprowadzana do wspólnej wewnętrznej zakładowej sieci SN i rozplywa się proporcjonalnie po wszystkich obiektach zakładu, zależnie od występującego aktualnie zapotrzebowania każdego z obiektów;
 - skuteczną niwelację negatywnego zjawiska ponadnormatywnego wzrostu napięcia w sieci zasilającej urządzenia odbiorcze nN – występujące w układach z PV przyłączonym bezpośrednio do takiej sieci [4].
- Tym samym problem samoczynnych wyłączeń inwerterów w efekcie przekroczenia napięcia – w omawianej instalacji nie występuje.

Ponadto zakład posiada agregat prądowłóczy o mocy 608 kVA, pozwalający na pracę wyspową obiektu magazynu automatycznego wysokiego składowania (LUMC), na

wypadek wystąpienia ograniczeń w dostępie mocy w krajowym systemie elektroenergetycznym.

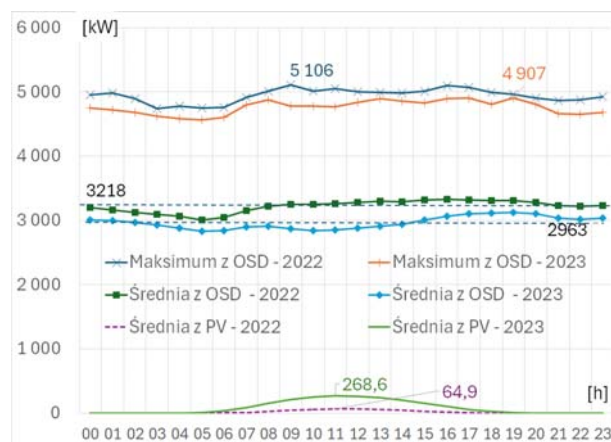
Charakterystyka bilansu elektroenergetycznego

Zakład zużywa rocznie ponad 27,3 MWh energii elektrycznej (patrz tabela 1), zaś moc zamówiona zakładu to 5 MW. Uruchomienie własnego źródła OZE PV nie wpłynęło znacząco na roczny bilans elektroenergetyczny zakładu, w roku 2022 (uruchomienie instalacji we wrześniu) generacja z farmy fotowoltaicznej stanowiła 0,6% rocznego zużycia energii elektrycznej, zaś eksploatacja tego źródła przez pełen rok pozwoliła na uzyskanie w bilansie pułapu niecałych 3%. Należy jednak zauważyć, że z perspektywy ODS, redukcja poboru energii elektrycznej zarejestrowana na liczniku rozliczeniowym, wyniosła 5,6% w relacji rok 2023 do roku 2022. Nie była to jednak redukcja wynikająca wyłącznie z uruchomienia własnego źródła, ale również ze wzrostu świadomości szczebla kierowniczego, decyzji operacyjnych i proefektywnościowych, wdrożonych w zakładzie przetwórczym, które wynikały z prowadzonych badań nad wewnętrzną strukturą energochłonności poszczególnych technologii przetwórczych i urządzeń towarzyszących tła [5].

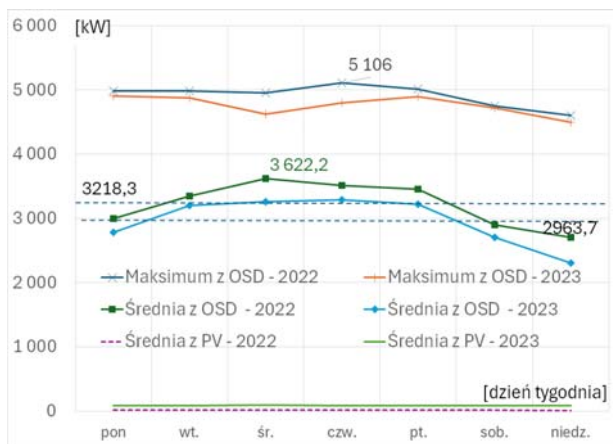
Tabela 1. Bilans elektroenergetyczny zakładu w latach 2022-2023

Rok	Pobór EE z OSD [MWh]	Zużycie EE [MWh]	Generacja PV [MWh]	Udział generacji PV [%]
2022	28 193	28 352	159	0,6
2023	26 619	27 372	754	2,8
Δ [MWh]	-1 574	-980	595	-
Δ [%]	-5,6	-3,5	373,4	-

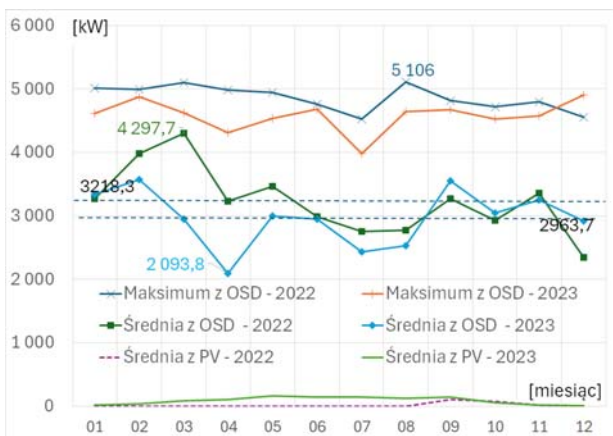
Średniogodzinowy pobór mocy z sieci OSD, w roku 2022 wyniósł 3218 kW, zaś w roku 2023 już 2963 kW – co zilustrowano na rysunku 3 – wynikowo daje to średni godzinowy spadek poboru energii elektrycznej z sieci OSD, nawet o 255 kWh. Średniogodzinowy ubytek poboru mocy z systemu OSD nie wynika jednak z wprowadzenia własnego źródła zasilania OZE, gdyż – jak wskazano na tym samym rysunku 3 – średni uzysk godzinowy z instalacji PV wyniósł maksymalnie 268,6 kWh – dla godziny 11, zaś w pozostałych godzinach odpowiednio mniej – co jest naturalne dla dobowego cyklu pracy źródła fotowoltaicznego. W zakresie charakterystyk średniego poboru mocy z OSD, generacja PV odpowiada za odpowiednio szerszy obszar między krzywymi: niebieską (2023) i ciemnozieloną (2022) dla godzin aktywności PV, tj. między 7-dmą a 16-tą, krzywa jasnozielona (rys. 3).



Rys.3. Średni godzinowy rozkład mocy, maksymalny pobór mocy dla danej godziny roku, średnia generacja z OZE w danej godzinie



Rys.4. Średni tygodniowy rozkład mocy pobieranej z OSD



Rys.5. Średni miesięczny rozkład mocy pobieranej z OSD

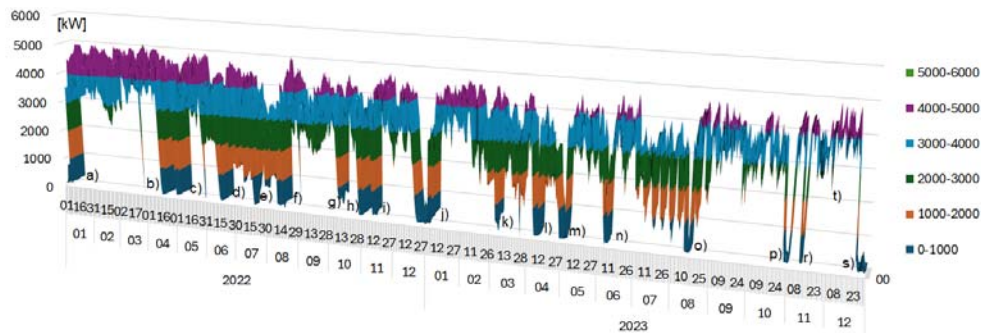
W zakresie mocy maksymalnych pobranych z systemu OSD, w roku 2023 nie wystąpiły sytuacje przekroczenia

mocy umownej (rys. 3), krzywa pomarańczowa jest w całości poniżej 5 MW, a najwyższa moc pobrana to 4,907 MW. Natomiast w roku 2022, szczególnie w godzinach 8 – 18, zakład narażony był na pracę na granicy mocy zamówionej, zaś czterokrotnie wystąpiły sytuacje przekroczenia tego poziomu. Uruchomienie własnego źródła OZE poprawiło kontrolę mocy maksymalnej pobieranej z OSD i skutkowało redukcją przypadków naliczenia kar na przekroczenie mocy umownej.

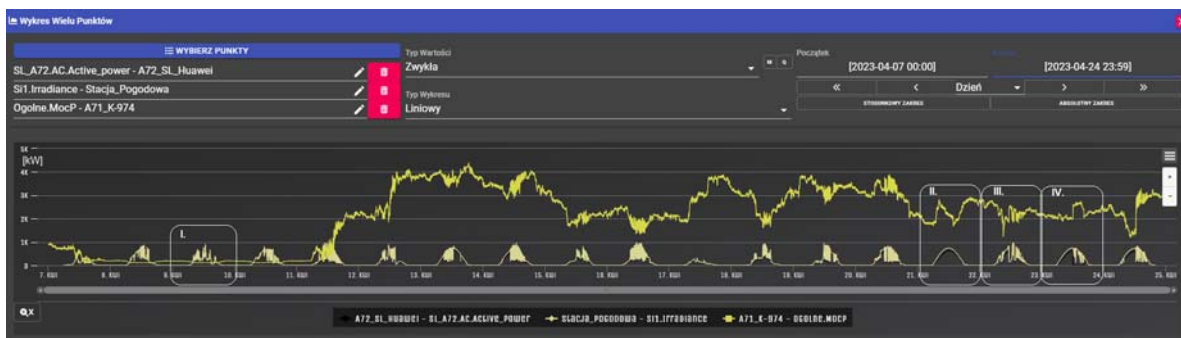
Obserwacja charakterystyk godzinowych (rys. 3) wskazuje na wyższą aktywność zakładu w godzinach 7-21, oraz na nieco niższą w godzinach 22-6 (przypadających na 3 zmiany roboczą).

W ujęciu tygodniowym przebieg charakterystyk średnich wskazuje na znacznie wyższą aktywność wykazując w dniach: wtorek do piątek, typowe dni robocze, choć zdarzają się sytuacje, kiedy już od poniedziałku zakład pracuje z pełną mocą – o czym świadczy rozkład mocy maksymalnych (rys. 4).

W ujęciu rocznym (rys. 5), miesiące o obniżonym średnim zapotrzebowaniu na moc pobraną z systemu OSD przypadają na okres letnich wakacji - sezon urlopowy, zmniejszona obsada zmian i praca tylko wybranych linii przetwórczych. Uwagę przykuwają również miesiące: marzec - gdzie w zestawieniu rok 2022 produkcja, a w raz z nią średni pobór mocy z sieci OSD był znacznie wyższy o ok. 1,3 MW w stosunku do roku 2023; podobnie w kwietniu, miesiącu o średnio niższym zapotrzebowaniu z uwagi na przypadające święta Wielkanocne, przewaga roku 2022 wobec roku 2023 przekroczyła 1,1 MW. Dla roku 2023 kwiecień był miesiącem o średnio najniższym zapotrzebowaniu na moc z OSD w obserwowanej skali – średniogodzinowe zapotrzebowanie na moc wyniosło 2093,8 MW, co stanowi ok. 42% mocy zamówionej przez zakład. Z wykresu rocznego (rys. 5) zaobserwować można również okres rozpoczęcia pracy farmy fotowoltaicznej – przypadający na wrzesień 2022 – linia przerywana w kolorze fioletowym.



Rys.6. Dobowo-godzinowa zmienność obciążenia sieci OSD przez zakład przetwórczy w ujęciu obserwowanych lat 2022-2023



Rys.7. Ekran programu SCADA_ML prezentujący przebiegi chwilowe rejestrowanych wielkości, za okres 7-24 kwietnia 2023

Przedstawiona powyżej analiza odnosi się do ogólnej charakterystyki pracy przedsiębiorstwa przetwórczego oraz wynikającego z niej średniego zapotrzebowania na moc w ujęciu dobowym, tygodniowym, czy też próby uchwycenia elementów sezonowości w ujęciu rocznym. Rzeczywista charakterystyka dobowo godzinowa zapotrzebowania na moc, zarejestrowaną przez licznik rozliczeniowy z sieci OSD została przedstawiona na rysunku 6. Widoczne są na nim naturalne okresy redukcji obciążenia wynikające nie tylko z kalendarza świąt jak: a) kończąca się 7 stycznia 2022 przerwa świąt Bożego Narodzenia; b) Wielkanoc 2022; c) weekend majowy 2022; d) Boże Ciało 2022; f) Święto Wojska Polskiego; h) Wszystkich Świętych; i) Święto Niepodległości; j) Boże Narodzenie 2022; i) Wielkanoc 2023; m) weekend majowy 2023; n) Boże Ciało 2023; o) Święto Wojska Polskiego 2023; p) Wszystkich Świętych 2023; r) Święto Niepodległości 2023; s) Boże Narodzenie 2022; ale i z planowych przez zakład wyłączeń wynikających z przeprowadzanych prac serwisowych lub instalacyjnych, jak: e) montaż i podłączenie podstacji SN T23 w dniu 16.07.2022; k) podpięcie i uruchomienie agregatu 5.03.2023. Jako ciekawostkę oznaczono również pik t) zanotowany podczas testu kontrolnego dla wyznaczenia usługi DSR przypadający na 30.11.2023. Kolejną prawidłowość jaką można odczytać z przebiegu zmienność obciążenia sieci OSD to fakt znacznie częstszej pracy zakładu w granicach 4000 – 5000 kW, pełnego zapotrzebowania na moc zamówioną w roku 2022 - większe nasycenie wykresu kolorem fioletowym, wobec zapotrzebowania w roku 2023, gdzie nasycenie obszarów fioletowych jest znacznie mniejsze.

Wybrane przypadki przebiegów chwilowych

W tej części raportu przedstawiono analizę przebiegów chwilowych poboru mocy z systemu OSD wobec naświetlenia (ang. *irradiation*) rejestrowanego przez stację pogodową zintegrowaną z farmą fotowoltaiczną oraz generacji chwilowej uzyskiwanej ze źródła OZE. Znaczna szczegółowość danych wymusza zawężenie okresu analizy. Na rysunku 7 zamieszczono ekran wyeksportowany z systemu SCADA_ML, jest to system nadzorujący pracę farmy OZE-PV, na którym to ekranie wyświetlane są wykresy chwilowe następujących wielkości:

- moc pobierana przez zakład z sieci OSD – oznaczenie jaskrawożółte opisane na wykresie jako: „DS_A71_K-974_-_Ogolne.MocP” (w dalszej analizie w arkuszu kalkulacyjnym wielkość oznaczona opisem „ P_{zapOSD} ”);
- natężenie światła słonecznego – oznaczenie bladeżółte opisane jako: „DS_Stacja_Pogodowa_-_Si1.Irradiance”;
- moc generowana przez OZE-PV – oznaczenie na wykresie przebiegu kolorem czarnym – opisane jako: „DS_A72_SL_Huawei_-_SL_A72.AC.Active_power” (w dalszej analizie w arkuszu kalkulacyjnym wielkość oznaczona opisem „ P_{genOZE} ”);

za okres 7.04.2023 godz. 00:00 do 24.04.2023 godz. 23:59. Przebiegi są skalibrowane, na wspólnej osi rzędnych reprezentują moc w tysiącach watów [kW] – zatem wartość 5K [kW] należy czytać jako 5 [MW].

Z obserwacji krzywej chwilowego natężenia światła słonecznego wynika, że w analizowanym okresie pogoda była bardzo zmienna, przy czym jedynie w dniu 21 kwietnia pogoda była bezchmurna, w dniu 17 kwietnia występowało całkowite zachmurzenie, w pozostałych dniach poziom zachmurzenia był zróżnicowany, co widoczne jest jako charakterystyczny przebieg „piły” z zębami skoków natężenia światła odnotowywanego przez stację pogodową. Jak ta zmienność pogody wpłynęła na moc generowaną przez źródło OZE, a pośrednio na charakterystykę chwilowego

zapotrzebowania na moc pobraną z sieci OSD – omówione zostanie dla przypadków:

- 9 kwietnia 2023, Niedziela Wielkanocna, zakład nie pracował;
- 21 kwietnia 2023, piątek, idealne warunki pogodowe, zakład pracował;

22 kwietnia 2023, sobota, zmienne warunki pogodowe, zakład pracował;

- 23 kwietnia 2023, niedziela, bezchmurne niebo do południa, pochmurne popołudnie, zakład pracował.

Przypadki te oznaczono na rysunku 7 białą obwódką i ponumerowano cyframi rzymskimi. Na potrzeby dyskusji dokonano eksportu danych i odtworzono te przebiegi w arkuszu kalkulacyjnym, nakreślając dodatkowy przebieg chwilowego zużycia energii elektrycznej przez zakład, na rysunkach 8-11 oznaczony opisem „ P_{zapTOT} ”, przy czym przebieg ten uzyskano jako wynik formuły (1):

$$(1) \quad P_{zapTOT} = P_{zapOSD} + P_{genOZE}$$

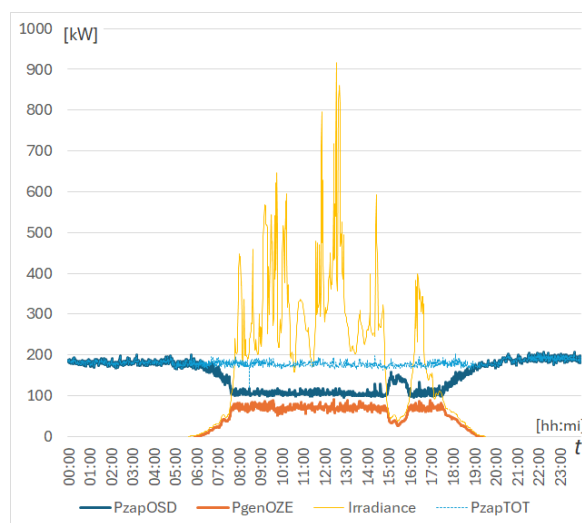
Działanie takie jest poprawne z uwagi na wymóg warunków przyłączeniowych operatora, aby farma fotowoltaiczna posiadała system zabezpieczenia przed wy wpływem energii do sieci dystrybucyjnej.

Przypadek I. Działanie systemu antywyływowego.

Dni przestoju zakładu występują kilka razy w roku, jak pokazano na rysunku 6. Wówczas minimalne podtrzymanie to niespełna 200 kW mocy pobieranej przez zakład, niezbędnej do pracy systemów ICT, monitoringu czy oświetlenia. Na rysunku 8 moc podtrzymania prezentowana jest jako jasno niebieska linia P_{zapTOT} , która w godzinach nocnych w całości pobierana jest z sieci OSD (2):

$$(2) \quad P_{zapTOT} = P_{zapOSD},$$

dla $t \in (00:00,05:30) \cap (19:30,24:00)$, gdzie $P_{genOZE} = 0$ kW.



Rys.8. Charakterystyki mocy chwilowych, w dniu 9 kwietnia 2023

W czasie $t \in (05:30,19:30)$, poziom nasłonecznienia był zmienny, w znakomitej większości znacznie przekraczał jednak 200 kW – co reprezentuje na rysunku 8 linia jasno żółta. Pomimo to generacja P_{genOZE} – linia pomarańczowa, wraz z wschodem słońca, osiągnęła limit 80-98 kW, nie przekraczając $\frac{1}{2} P_{zapTOT}$, a pozostałą część mocy zapotrzebowanej zakład pobierał z sieci OSD. Zadziałał tu system antywyływowy, który monitoruje na poziomie SCADA_ML poziom mocy P_{zapOSD} , i gdy ta spadnie poniżej 100 kW, tak reguluje pracę inwerterów, by równoważył

generację z mocą pobieraną z sieci dystrybucyjnej. Funkcję celu regulatora reprezentuje równanie (3):

$$(3) \quad P_{genOZE} \leq P_{zapOSD}$$

dla $P_{zapOSD} < 100$ kW.

Płynna regulacja jest możliwa, gdyż w omawianej instalacji, SCADA_ML dysponuje 162 stringami podłączonymi do 11 inwerterów, których kontrolowana praca daje możliwość stopniowania mocy wytwarzanej.

Poprawnie działający system antywyływyowy odpowiada za rolę podmiotu w krajowym systemie elektroenergetycznym – w tym przypadku omawiany zakład przetwórczy jest autokonsumentem [6]. Wyprodukowana energia E_{genOZE} jest skonsumowana (zużyta) w całości na własne potrzeby.

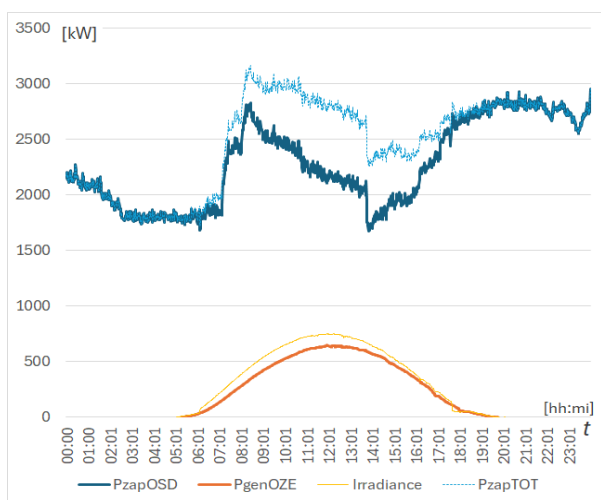
Przypadek II. Niezakłócona praca farmy fotowoltaicznej.

Idealne warunki pogodowe, jakie wystąpiły 21 kwietnia 2023, są na rysunku 9 uwidocznione jako krzywa Gaussa dla rejestrowanego nasłonecznienia (irradiance), jak również nieograniczana i niezakłócona niczym krzywa mocy wytwarzanej przez farmę fotowoltaiczną P_{genOZE} również zachowuje taki kształt.

Przypadek ten jest również potwierdzeniem funkcjonowania omawianego podmiotu w krajowym systemie elektroenergetycznym jako autokonsumenta, gdyż pole nakreślone między krzywymi P_{zapTOT} oraz P_{zapOSD} jest równe polu pod krzywą P_{genOZE} , co opisuje równanie (4)

$$(4) \quad \int P_{genOZE}(t)dt = \int P_{zapTOT}(t)dt - \int P_{zapOSD}(t)dt,$$

gdzie przedział całkowania dla autokonsumenta obejmuje dowolny horyzont t .



Rys.9. Charakterystyki mocy chwilowych, w dniu 21 kwietnia 2023

Dla idealnych warunków pogodowych farma fotowoltaiczna nie generuje niestabilności w podaży mocy P_{genOZE} , a zmienność obciążenia sieci OSD jest konsekwencją załączania i odłączania odbiorów po stronie popytu, tu urządzeń technologii przetwórczej i tła w zakładzie – krzywa

P_{zapOSD} zachowuje podobną zmienność jak krzywa P_{zapTOT} , co można dostrzec w przebiegach jasno i ciemno niebieskich linii na rysunku 9.

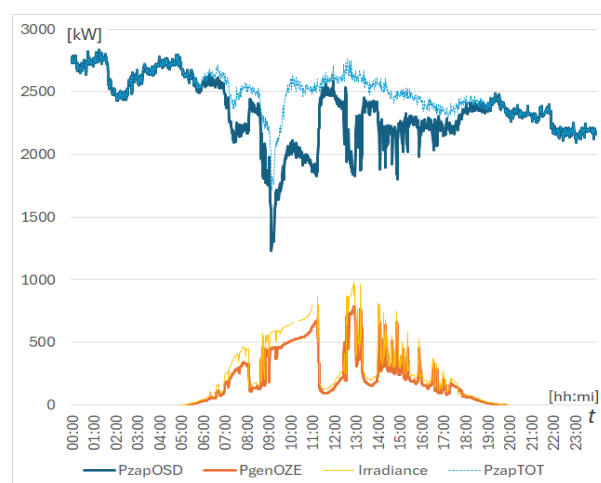
Jest to najbardziej pożądany przykład pracy farmy fotowoltaicznej, zarówno przez przedsiębiorców [7], jak i indywidualnych prosumentów [8] decydujących się na inwestycję w farmę fotowoltaiczną, i kalkulujących zwrot z

inwestycji, bazując na obliczeniach dla przebiegów średnich prognozowanych dla danego regionu, reprezentowanych Gaussowską krzywą nasłonecznienia [9].

Przypadek III. Niestabilność źródła OZE kompensowana przez sieć OSD.

Idealne warunki nasłonecznienia w omawianej lokalizacji nie występują często, co można zaobserwować na rysunku 7. Znacznie częściej występujące zachmurzenie zmienne przekłada się na zmienność mocy P_{genOZE} wytwarzanej przez źródło OZE-PV. Jak przedstawiono na rysunku 10 – linia pomarańczowa jest „poszarpaną wersją krzywej Gaussa” co wynika bezpośrednio ze zmienności nasłonecznienia – linia jasnożółta – irradiance.

Niestabilność ta nie przekłada się na zmienność krzywej zapotrzebowania na moc zakładu, P_{zapTOT} – linia jasnoniebieska – ma znacznie mniejszą dynamikę zmian w porównaniu z pozostałymi krzywymi. Dzieje się tak, gdyż dynamikę zmian bierze na siebie sieć OSD, która zgodnie z równaniem (1) kompensuje ubytki mocy w źródle OZE-PV.



Rys.10. Charakterystyki mocy chwilowych, w dniu 22 kwietnia 2023

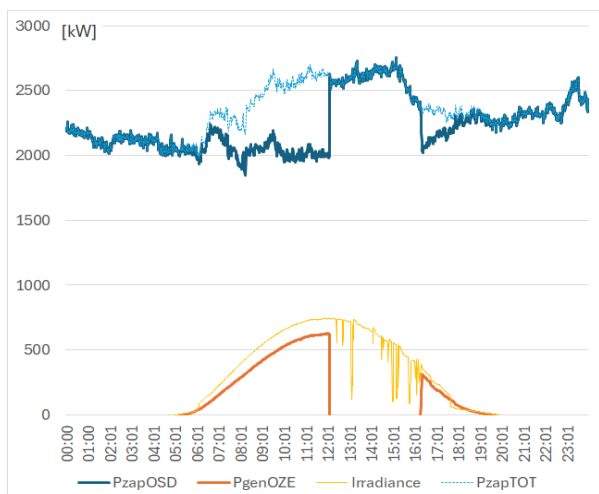
Nie oznacza to jednak, że źródło OZE jest jedynym czynnikiem generującym taką dużą zmianę w obciążeniu sieci OSD. Porównując pik z godz. 9:00 (rys. 9) a pozostałe piki wywołane w sieci OSD w godzinach 11:00-17:20, to jest on znacznie większy. Wówczas mimo że generacja wynosiła wówczas prawie 500 kW, pik z godz 9:00 przekroczył 1100 kW i był spowodowany wyłączeniem technologii przetwórczej, a nie zanikiem generacji.

Obserwowany na rysunku 9 charakterystyczny przebieg „piłowy” generacji OZE-PV wynika wprost ze zmienności zachmurzenia. Przypadki wyłączenia inwertera z tytułu przekroczeń napięć, jak opisywane w [4, 10], w omawianej instalacji nie występują, gdyż farma fotowoltaiczna jest przyłączona do sieci SN poprzez dedykowany wyłącznie dla niej transformator T23 (rys. 2), tym samym nie występuje ryzyko przekroczenia poziomu napięcia $230/400$ V $\pm 10\%$ [11], będące częstym ograniczeniem technicznym w instalacjach prosumenckich, z uwagi na brak zdolności odbioru mocy ze źródeł OZE przez nieelastyczne ograniczenia nastaw transformatorów w liniach dystrybucyjnych [4].

Przypadek IV. Podwójnie nierynkowe redysponowanie ograniczeń generacji OZE-PV

Przypadek z 23 kwietnia 2023, kiedy to po raz pierwszy w Polsce dla instalacji fotowoltaicznych [12] wprowadzono nierynkowy mechanizm redysponowania ograniczeń mocy

wytwarzanej [13], który to mechanizm dotknął również omawiany zakład przetwórczy.



Rys. 11. Charakterystyki mocy chwilowych, w dniu 23 kwietnia 2023

Widoczna na rysunku 11 przerwa w wytwarzaniu mocy P_{genOZE} w godzinach 12:00 – 16:00, i to pomimo występujących dobrych warunków pogodowych, naraziła zakład na skokowy pobór mocy z sieci OSD – przebieg ciemnoniebieskiej krzywej P_{zapOSD} zwiększył się z poziomu 2000 kW przed godz. 12:00 do ponad 2600 kW po wyłączeniu instalacji fotowoltaicznej. Tym samym zakład, który jako autokonsument, w całości zużywający energię wytwarzaną przez źródło OZE-PV, nieposiadający możliwości jej wprowadzenia do sieci OSD, został potraktowany jak inni wytwórcy OZE niebędący autokonsumentami i został zadysponowany do odłączenia wytwarzania energii z OZE na własne potrzeby.

W ocenie autorów jest to podwójnie nierynkowe działanie, gdyż jako zakład przetwórczy, jako autokonsument, nie posiada ten podmiot możliwości wprowadzenia energii z OZE do sieci OSD, a tym samym nie pogarsza parametrów pracy krajowego systemu elektroenergetycznego. Natomiast będąc odłączonym od własnego źródła OZE, z automatu zwiększa pobór brakującej mu mocy z sieci OSD – a tym samym znacząco poprawia parametry jej pracy. Jest to więc usługa elastyczności, za którą to jednak w omawianym przypadku płaci sam zakład przetwórczy – autokonsument, gdyż ponosi koszty zarówno za zakup brakującej energii z sieci, jak i za jej przesył oraz moc dostarczoną. Z arytmetycznego punktu widzenia jest to więc podwójnie nierynkowe działanie ze strony spółki OSD, która realizując dyspozycję PSE wprowadzenia ograniczeń, wymusza na podmiocie autokonsumenta usługę elastyczności, i dodatkowo obciąża go za wykonanie tej usługi.

W ocenie autorów klasyfikowanie autokonsumentów do wspólnej grupy wytwórców energii ze źródeł OZE objętych nierynkowym redysponowaniem ograniczeń generacji jest kontrowersyjne i nie powinno być stosowane.

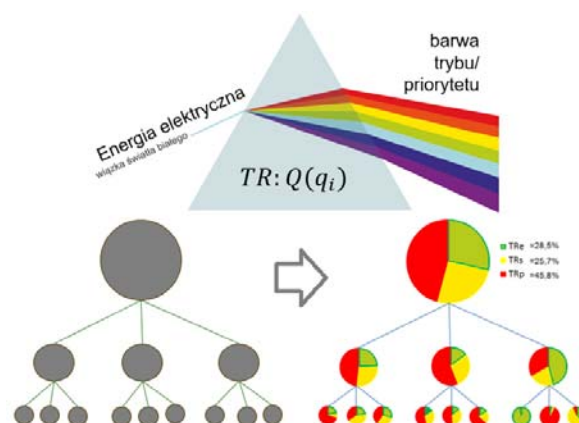
W omawianym przypadku podmiot nie ma możliwości wprowadzenia energii elektrycznej do sieci OSD, gdyż całość zużywa na własne potrzeby. Ewentualne nadwyżki P_{genOZE} w okresach obniżonego zapotrzebowania P_{zapTOT} są automatycznie niwelowane przez system SCADA_ML monitorującą pracę farmy fotowoltaicznej.

W dalszej części przedstawiono metodykę kompensacji niestabilności źródła OZE przez pryzmat modelu Trybów Zasilania [14].

Kompensacja niestabilności źródła OZE

W zakresie realizowanych prac badawczych [5] zespół miał zadanie określić możliwość kompensacji niestabilności źródła OZE poprzez zarządzanie stroną popytu. Aby móc określić chwilowe zapotrzebowanie na moc elektryczną poszczególnych technologii przetwórczych i urządzeń tła, dokonano pomiarów ich pracy, a następnie bazując na modelu Trybów Zasilania [14, 15, 16], dokonano klasyfikacji poszczególnych rozplywów i przypisano im poziomy istotności: 0, 1, 2, 2a, 3, 4, gdzie 4 – najwyższa istotność dedykowana do technologii przetwórczych oraz systemów bezpieczeństwa, 3 – urządzenia bezpośrednio współpracujące z technologią przetwórczą, bez których technologia nie może efektywnie realizować procesu, 2 – to urządzenia, które w pewnych okresach mają priorytet 2, w innych priorytet 3 – zależnie od występującej sytuacji na danym obiekcie produkcyjnym, 2 – urządzenie towarzyszące, nie powiązane bezpośrednio z technologią, ale pełniące funkcje pomocnicze, 1 urządzenia tła zachowujące swoją autonomię pracy, ale służące poprawie warunków pracy na obiektach, 0 – urządzenia tła mogące realizować pracę w trybie na żądanie.

Nadając tym poziomom istotności priorytety zgodnie co do numeracji z danym poziomem oraz stosując zabieg „kolorowania” poszczególnych priorytetów barwami tęczy, uzyskano perspektywę oceny jakościowej zużycia energii wewnątrz zakładu (po stronie popytu) poprzez pryzmat Trybów Zasilania.



Rys. 12. Koncepcja modelu Trybów Zasilania

Tu celowo przywoływany jest pryzmat (rys. 12), gdyż pod względem koncepcyjnym, tak jak pryzmat rozszczepia wiązkę białego światła na barwy składowe, tak model Trybów Zasilania rozdziela jednorodny strumień energii elektrycznej pobieranej przez danego odbiorcę w węzle pomiarowym WP_i , na wiele pasm jakościowych tej samej energii, ale zróżnicowanych, co do wybranych cech jakościowych q_i opisujących każde z pasm, nazwanych trybem zasilania urządzenia lub grupy urządzeń podłączonych (skonfigurowanych) do pracy w danym trybie.

$$(5) \quad E_{WP_i} = \sum_{j=1}^k E_{TR_j},$$

gdzie: E_{TR_j} – energia elektryczna zużywana w i -tym trybie zasilania, k – liczba dostępnych trybów zasilania,

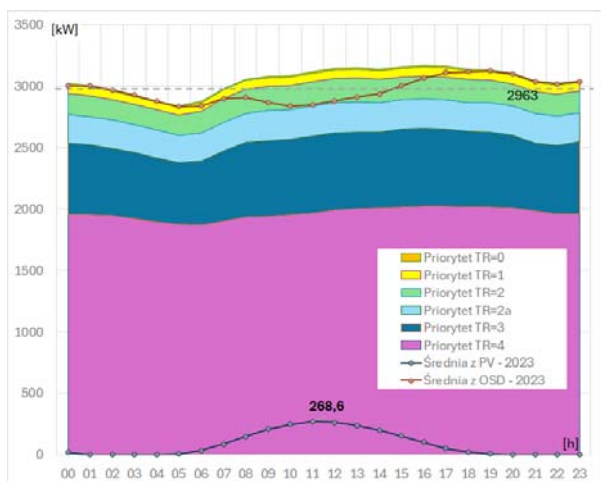
oraz zbiór cech jakościowych opisujących dany tryb jest niepusty:

$$(6) \quad TR:Q(q_i) / \{0\},$$

gdzie: $q_i < q_{(i+1)}$, co oznacza, że cechy te dają się wzajemnie wartościować.

Zgodnie z formułą (5), ilość energii w danym węźle pomiarowym się nie zmienia. Nadal z perspektywy obserwatora w danym węźle ma on możliwość pomiaru ilościowego sumy zużycia oraz struktury ilościowej zużycia we wszystkich węzłach mu podległych – ale uwaga, w klasycznym podejściu – reprezentowanym szarym grafem na rysunku 12 – jest to wyłącznie możliwość pomiaru i rozliczenia węzłów podległych wg ilości i czasu zużycia. Model Trybów Zasilania pozwala spojrzeć na tę samą strukturę w dodatkowym wymiarze – uwzględniającym priorytet urządzeń załączonych do pracy w danym trybie. Agregacja zużycia energii w poszczególnych trybach (z danym priorytetem) z węzłów podległych do głównego węzła decyzyjnego – daje możliwość poznania struktury ilościowej i jakościowej aktualnego zużycia energii elektrycznej.

W rozumieniu prowadzonych badań, cecha jakościowa determinuje istotność pracy poszczególnych technologii i urządzeń tła w zakładzie przetwórczym. Tym samym uzyskano projekcję łącznego zapotrzebowania zakładu na moc P_{zapTOT} , w podziale na poszczególne tryby zasilania (rys. 13).



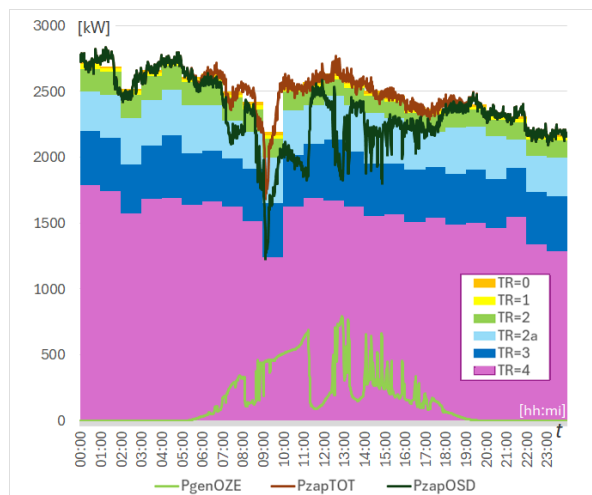
Rys.13. Sredni godzinowy rozkład mocy dla roku 2023, moc zapotrzebowana przez zakład w podziale na pasma TR

Przedstawione na rysunku 8 naniesione krzywe średniej generacji OZE-PV w roku 2023, jak i średniego poboru mocy z OSD, pozwalają dostrzec pewną ogólną prawidłowość, iż na poziomie średnich całość generacji OZE pokrywa potrzeby urządzeń tła – tu zasilanych w trybach TR=0, TR=1 i TR=2. Natomiast wrażliwa technologia przetwórcza (TR=4) oraz urządzenia jej towarzyszące (TR=3) lub okresowo towarzyszące (TR=2a) w całości pozyskują energię z sieci OSD – krzywa „średnia z OSD – 2023” przebiega w obszarze nie schodzącym poniżej zielonego pasma TR = 2 (rys.13), na poziomie średniego zapotrzebowania na moc w danej godzinie.

Skoro zatem na poziomie średnich broniona jest teza, iż niestabilne źródło OZE-PV, służy per saldo, wyłącznie do zasilania urządzeń tła, o stosunkowo mniejszej wrażliwości na przerwy w ciągłości zasilania, to czy dla przebiegów chwilowych, tę prawidłowość da się również potwierdzić?

Omawiany wcześniej przypadek III, gdzie przebieg chwilowy o znacznej zmienności mocy P_{genOZE} wytwarzanej przez źródło OZE w dniu 22.04.2023 (rys. 10) oraz pobór mocy P_{zapOSD} kompensujący tę zmienność, naniesiono na pasma wyznaczone dla tego dnia z modelu Trybów Zasilania (rys.14). Pasma trybów zasilania przybrały tu postać obszarów schodkowych, z uwagi na odrębne godzinowe ziarno granuli czasu, podczas gdy przebiegi chwilowe są reprezentowane z granułą minutową. Ze

względu na kontrast tak złożonego wykresu, wymagana była również zmiana koloru poszczególnych charakterystyk chwilowych: P_{zapOSD} kreślona jest krzywą w kolorze ciemnogranatowym, P_{genOZE} jaskrawozielonym, P_{zapTOT} ciemnoniebieskim.



Rys.14. Charakterystyki mocy chwilowych, w dniu 22 kwietnia 2023, moc zapotrzebowana przez zakład w podziale na pasma TR

Tym razem zakres zmienności P_{zapOSD} nie pokrywa się z pasmem trybów TR=0 – TR = 2 (pomarańczowy do zielony), wkracza często w pasma trybów TR=2a (jasno niebieski) oraz TR=3 (ciemnoniebieski). Co należy odczytać, że w tym przypadku potencjał samych odbiorów tła dla kompensacji zjawiska niestabilnej pracy farmy fotowoltaicznej jest niewystarczający (zbyt mały). Chociaż optymistycznym wnioskiem może być fakt, że odnotowana zmienność nie wpłynęła bezpośrednio na pracę urządzeń o najwyższym TR=4 priorytecie. To jednak znaczna zmienność obciążenia sieci OSD, jak i obserwowane krótkotrwałe, poniżej 15 min, redukcje generacji OZE, wymagają doboru urządzeń odbiorczych o zbliżonej cyklem charakterystyce pracy – tu pewien potencjał stanowią urządzenia transportu liniowego (do przenoszenia palet, transportu zboża czy mąki) ich chwilowe odłączenie od zasilania nie przerywa procesu, a jedynie zakłóca jego płynność, zmniejszając wydajność. Większym wyzwaniem mogą okazać się dłuższe – ponad godzinne okresy zachmurzenia – które będą wymagały odłączenia urządzeń towarzyszących liniom produkcyjnym – a tym samym mogą wpłynąć na ich stabilność pracy – co jak zaznaczono we wstępie do raportu – jest projekcją nieakceptowalną. Niemniej w zakresie charakterystyk uśrednionych (rys. 13) potwierdzono podatność metody opartej na modelu Trybów Zasilania dla kompensacji niestabilności źródła OZE.

Podsumowanie

Przedstawiono aspekty projektowe farmy fotowoltaicznej o mocy 1,16 MWp, zainstalowanej w wewnętrznym systemie elektroenergetycznym zakładu przetwórczego branży spożywczej. Wskazano na trafne decyzje projektowe w zakresie optymalizacji efektywności energetycznej instalacji OZE oraz jej podatności na wymuszenia w zakresie regulacji pracy.

Przedstawiono bilans elektroenergetyczny zakładu i wpływ źródła PV na charakterystyki zapotrzebowania mocy z sieci OSD w ujęciu średniogodzinowym, tygodniowym i z podziałem na miesiące, dla dwu lat 2022-2023 realizacji projektu NCBiR.

Omówiono mechanizm zapewniający pracę farmy w trybie pełnej autokonsumpcji przez podmiot wdrażający projekt.

Omówiono i zakwestionowano zasadność nierynkowego redysponowania ograniczeń mocy wytwórczych z OZE w odniesieniu do autokonsumentów – wskazując na mechanizm podwójnej nierynkowości, odnotowany przez badany zakład.

Omówiono zjawisko niestabilności pracy źródła OZE oraz dokonano pozytywnej weryfikacji metody klasteryzacji rozptyłów wewnętrznych w oparciu o model Trybów Zasilania.

Dalsze kierunki prac badawczych, wynikające z wypracowanych przez zespół wniosków:

- nad możliwością dynamicznej reklasyfikacji rozptyłów mocy na tryby zasilania, z uwzględnieniem kontroli stanów magazynowych i projekcji priorytetów procesów produkcyjnych uwzględniających takie krosprocesowe analizy;
- możliwością wprowadzenia do zakładu magazynów energii [18, 19], w tym doboru ich wielkości i parametrów pracy, pozwalających na przejęcie nadwyżek z krótkookresowej zmienności generacji OZE i jej wykorzystania w okresie zmniejszonej podaży;
- analizy szczegółowe poszukujące możliwych odcinkowych czy procesowych usprawnień w zakresie wzrostu efektywności energetycznej.

Zespół z uwagą przygląda się też perspektywie wprowadzenia usługi elastyczności [20].

Prace badawcze, których wyniki zaprezentowano w raporcie zostały współfinansowane z projektu NCBiR nr POIR.01.01.01-00-2168/20, zatytułowanego „Opracowanie i wdrożenie systemu zarządzania energią z wykorzystaniem OZE w obszarze technologii wrażliwych na ciągłość zasilania”.

Autorzy: dr inż. Dariusz Bober, Uniwersytet Rzeszowski, Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Komputerowego, Kolegium Nauk Przyrodniczych, ul. Pigionia 1, 35-310 Rzeszów, E-mail: dbober@ur.edu.pl; dr inż. Robert Jędrzychowski, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroenergetyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: r.jedrychowski@pollub.pl; dr hab. inż. Piotr Miller, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroenergetyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: p.miller@pollub.pl; dr inż. Marek Wancerz, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroenergetyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: m.wancerz@pollub.pl; mgr inż. Michał Swórka, PZZ Lubella GMW sp z o.o., Dział Techniczny, ul. Wrotkowska 1, 20-469 Lublin, E-mail: m.sworka@maspex.com; mgr inż. Mirosław Pastuszek, PZZ Lubella GMW sp z o.o., Zarząd firmy, ul. Wrotkowska 1, 20-469 Lublin, E-mail: m.pastuszak@maspex.com.

LITERATURA

- [1] Jaskółowski W., Wiatr J., Instalacje fotowoltaiczne. Podstawy fizyczne działania. Ochrona odgromowa. Zasady neutralizacji zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w czasie pożaru *Zeszyty Naukowe SGSP* 2016, nr 59/3/2016, 71-99
- [2] Szymański B., Instalacje Fotowoltaiczne, *Globenergia*, 2023
- [3] Sybaris A., Mycie i czyszczenie paneli fotowoltaicznych, *Przegląd 10 robotów*, <https://lighthief.com/roboty-myjace-panele-fotowoltaiczne/>, data odczytu: [01.05.2024]
- [4] Łatka M., Analiza wybranych parametrów jakości energii elektrycznej w miejskich i rejonowych sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia z udziałem generacji rozproszonej na wybranym obszarze, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 2/2024, 34-37, DOI:10.15199/48.2024.02.06
- [5] [Projekt NCBiR, Opracowanie i wdrożenie systemu zarządzania energią z wykorzystaniem OZE w obszarze technologii wrażliwych na ciągłość zasilania, POIR.01.01.01-00-2168/20, 02.01.2021 - 31.12.2023
- [6] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K., Ocena efektywności generacji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych odbiorców przemysłowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 10/2019, 64-67, DOI: 10.15199/48.2019.10.13
- [7] Drzymała A., Korzeniewska E., Opłacalność inwestycji fotowoltaicznej przedsiębiorstw w świetle nowej ustawy OZE w Polsce *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 1/2020, 210-213, DOI: 10.15199/48.2020.01.47
- [8] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K., Ocena efektywności generacji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych odbiorców przemysłowych, *Rynek Energii*, 117/2015, 40-44
- [9] [Grycan W. Legislative Assistance for Prosumer Energy within the Framework of Electrical Safety of Power Network, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 2/2024, 66-69, DOI: 10.15199/48.2024.02.12
- [10] [Kajda Ł., Samul S., Regulacja napięcia w sieci nn z wykorzystaniem transformatora z podobciążeniowym przełącznikiem zaczeów w oparciu o pomiary z liczników AMI, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 4/2024, 16-19, DOI: 10.15199/48.2024.04.04
- [11] PN-IEC 60038:1999 „Napięcia znormalizowane IEC”
- [12] Jakóbiak W., Operator musiał hamować wiatraki, ale na rekompensaty jest sposób taki, <https://biznesalert.pl/polskie-sieci-elektroenergetyczne-rekompensaty-ograniczenia-ozere-dysponowanie-nierynkowe/>, data publikacji [24.05.2023]
- [13] Petelski Ł., Mechanizm nierynkowego ograniczania w wytwarzaniu energii elektrycznej z OZE, *nowa Energia*, Nr. 4/2022, 56-58
- [14] Bober D., Zasilanie odbiorcy w energię elektryczną poprzez tryby zasilania. *Rynek Energii*, 1(74)/2008 s. 27-32.
- [15] Bober D., Kęsik J., Demand side management of power: technology and income, *Actual Problems of Economics*, No 4(142) 2013, p. 278-286
- [16] Bober D., Kęsik J.: Metoda pomiaru energii elektrycznej uwzględniająca zróżnicowane tryby zasilania, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88 NR 10b/2012, s. 14-16
- [17] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K., Ocena efektywności generacji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych odbiorców przemysłowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 10/2019, 64-67, DOI: 10.15199/48.2019.10.13
- [18] Buczał M., Sumorek A., Buczał A., Funkcjonowanie magazynów energii jako układów ograniczających koszty zakupu energii elektrycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 4/2024, 277-280, DOI: 10.15199/48.2024.04.57
- [19] Mroziński A., Bilansowanie źródeł OZE w spółdzielni energetycznej z zastosowaniem optymalnego doboru członków oraz magazynowania energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 4/2024, 277-280, DOI: 10.15199/48.2024.03.17
- [20] Sikora M., Kierunki krajowych zmian prawnych w kontekście usług elastyczności. Nowa rola OSD na rynku energii. <http://elastycznosc.ptpiree.pl/konferencje/elastycznosci/2023/materiały/12.pdf> [data publikacji: 7.12.2023]