

doi:10.15199/48.2023.11.35

Ocena efektywności mikro elektrowni fotowoltaicznych w Polsce na podstawie analizy monitorowanego obiektu

Streszczenie. W artykule dokonano oceny efektywności mikro elektrowni fotowoltaicznych w Polsce na podstawie analizy monitorowanego obiektu zlokalizowanego w Wielkopolsce.

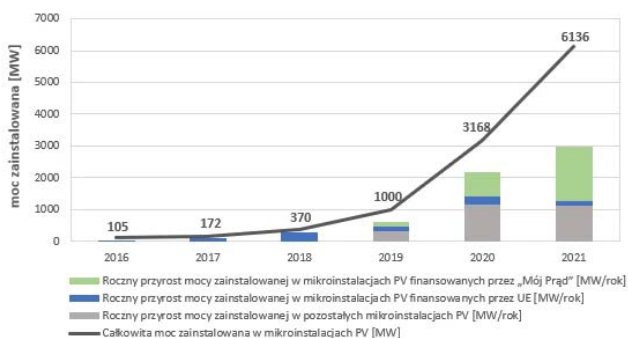
Abstract. The article assesses the effectiveness of photovoltaic micro power plants in Poland based on the analysis of the monitored facility located in Wielkopolska (*Evaluation of the efficiency of photovoltaic micro power plants in Poland based on the analysis of the monitored facility*).

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne; mikro elektrownie fotowoltaiczne; wydajność systemów fotowoltaicznych.

Keywords: photovoltaic panels; photovoltaic micro power plants; performance of photovoltaic systems.

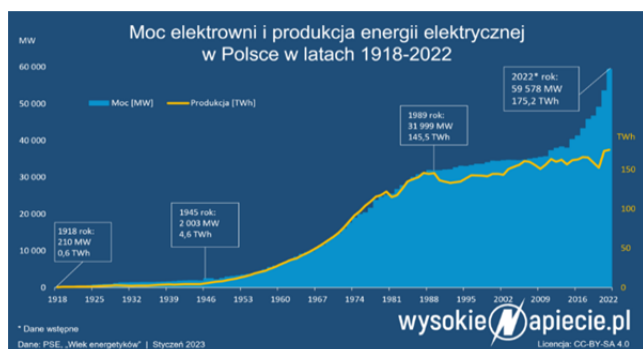
1. Wstęp

Institut Energetyki Odnawialnej opracowuje coroczne raporty na temat rozwoju systemów fotowoltaicznych (PV) w Polsce. Ostatni, dziesiąty (jubileuszowy) raport, zatytułowany „Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2022 r.” [1] ilustruje ogromny, spontaniczny i bezprecedensowy rozwój indywidualnych prosumenckich systemów fotowoltaicznych (rys. 1).



Rys. 1. Moc zainstalowana w systemach fotowoltaicznych w Polsce w latach 2016–2021 [1]

Dzięki energii odnawialnej moc wszystkich elektrowni w Polsce osiągnęła w 2022 r. prawie 60 GW a produkcja energii elektrycznej przekroczyła 175 TWh (rys. 2) [2].



Rys. 2. Moc elektrowni i produkcja energii elektrycznej w Polsce w latach 1918–2022 [2]

Moc zainstalowana w mikro elektrowniach fotowoltaicznych z końcem 2021 r. osiągnęła wartość 7,7 GW a na koniec 2022 r. przekroczyła nawet wartość 12 GW (ok. 20 % mocy wszystkich elektrowni w Polsce) [3]. Przyrost „zainstalowanej” mocy mikro elektrowni fotowoltaicznych w samym 2021 r. przekroczył 3,7 GW (roczny przyrost o ponad 100 %) a w 2022 r. przyrost mocy osiągnął prawie 56 %. Główny wkład w ten rozwój, tak aktualnie jak i w poprzed-

nich latach, mieli prosumenci indywidualni, których instalacje obejmują prawie 80% mocy zainstalowanej w systemach fotowoltaicznych w Polsce [1].

Z powyższych danych wynika, konieczność natychmiastowej i gruntownej modernizacji całego systemu elektroenergetycznego w Polsce w celu dostosowania go do coraz większego udziału w nim tzw. odnawialnych źródeł energii, których cechą jest duża zmienność intensywności produkcji energii elektrycznej.

Po pierwsze, zmiany powinny dotyczyć zapewnienia znacznie większej elastyczności i dynamiki regulacyjnej głównych elektrowni systemu elektroenergetycznego przy zapewnieniu przy tym ich małej awaryjności [4]. Aktualnie eksploatowane elektrownie węglowe mają małe (a nawet im są nowsze tym coraz mniejsze ze względu na wyższe parametry eksploatacyjne) możliwości regulacji mocy. Typowe, od wielu lat eksploatowane, „stare” bloki energetyczne o mocy 200 MW są przystosowane do jej zmniejszania jedynie do 140 MW a niekiedy do 90 MW w dwóch cyklach: dobowym i rocznym [5]. Aktualnie, do prawidłowej współpracy z systemami fotowoltaicznymi, potrzebne są znacznie krótsze stałe czasowe bezawaryjnych i mało kosztowych regulacji (rzędu minut a nie godzin), przy znacznie częstszych i głębszych zmianach mocy.

Po drugie, konieczna jest rozbudowa a raczej budowa na wielką skalę magazynów energii zarówno w postaci nowych wodnych elektrowni szczytowo-pompowych jak i stacji akumulatorowych, choć te stanowią istotne zagrożenie pożarowe. Powinno się także rozwijać nowe linie technologiczne o dużej elastyczności (np. produkcji wodoru do ogniw paliwowych).

Po trzecie, pilnej modernizacji wymaga przesyłowa sieć elektroenergetyczna zarówno w celu zwiększenia ilości przesyłanej w niej energii zwłaszcza w odcinkach prosumenckich jak i też zapewnienia wielokierunkowości przesyłu energii. Wreszcie bardzo istotne jest zdalne i elastyczne sterowanie przełączaniem odczepów transformatorów sieciowych, zwłaszcza transformatorów niskiego napięcia, w celu kompensowania zmian napięć wywołanych zmienną produkcją energii przez systemy fotowoltaiczne.

Niestety raptownemu wzrostowi potencjalnych mocy mikro elektrowni fotowoltaicznych nie towarzyszy adekwatna modernizacja i rozbudowa sieci elektroenergetycznej. W rezultacie raptowny wzrost zainstalowanej mocy elektrowni w Polsce nie przekłada się na odpowiedni wzrost produkcji energii elektrycznej (końcowe części wykresów na rys. 2).

2. Opis monitorowanej instalacji fotowoltaicznej

Opisane we wstępie zjawisko zbyt małego (a nawet ujemnego w latach 2020–21) przyrostu ilości produkowanej

w Polsce energii elektrycznej w stosunku do poczynionych nakładów na wzrost mocy elektrowni, zwłaszcza prosumentckich mikro elektrowni fotowoltaicznych (rys. 1) skłonił autorów do wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska. W tym celu monitorowano wybraną mikro elektrownię fotowoltaiczną i przeanalizowano produkcję w latach 2020-23.

Monitorowana mikro elektrownia fotowoltaiczna, zlokalizowana w Wielkopolsce, jest przedstawiona na rys. 3. Zawiera 80 monokrystalicznych paneli Axitec AC-310M/156-60S o znamionowej mocy szczytowej 310 Wp, sprawności energetycznej 19.05 %, napięciu znamionowym 32.88 V, prądzie znamionowym 9.43 A, napięciu rozwarcia 40.22 V i prądzie zwarcia 9.98 A. Zatem całkowita znamionowa moc szczytowa tej instalacji jest równa 24.8 kWp.



Rys. 3. Monitorowana mikro elektrownia fotowoltaiczna

W opisanej instalacji zastosowano trójfazowy falownik Fronius 20.0-3-M o maksymalnej mocy wejściowej DC 30 kWp, o znamionowej mocy wyjściowej AC 20 kW, maksymalnych prądach wyjściowych 28.9 A, współczynnika zawartości harmonicznych 1.3 % i sprawności 98 % (rys. 4). Ten falownik zawiera dwa układy MPP (układy śledzenia punktu maksymalnej mocy na charakterystyce łańcucha szeregowo połączonych paneli fotowoltaicznych). Badana instalacja jest skonfigurowana w cztery jednakowe dwudziesto-panelowe, łańcuchy szeregowo, ułożone w poziomych rzędach i parami dołączone do każdego z dwóch układów MPP falownika.



Rys. 4. Falownik i osprzęt monitorowanej mikro elektrowni fotowoltaicznej

Dzięki wyposażeniu badanej instalacji w inteligentny system pomiarowy Fronius Smart Meter 63A możliwy jest ciągły pomiar wszystkich mocy, napięć, prądów zarówno po stronie wejściowej DC jak i wyjściowej AC oraz współczynnika mocy instalacji.

3. Wyniki monitoringu instalacji fotowoltaicznej

Po stronie AC instalacji można wyróżnić następujące nieujemne (chwilowe) moce czynne:

- P_p moc produkowana

- P_z moc zużywana
- P_{zb} moc zużywana bezpośrednio z PV
- P_{zs} moc zużywana z sieci
- P_{ds} moc dostarczana do sieci.

Można sformułować następujące zależności:

$$(1a) \quad P_z = P_{zb} + P_{zs}$$

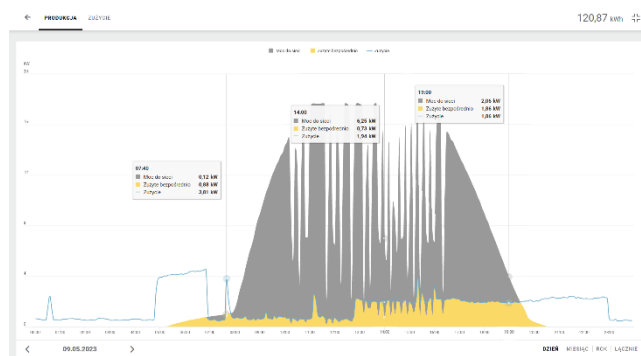
$$(1b) \quad P_p = P_{zb} + P_{ds},$$

z których wynika, że wystarczy monitorować trzy z tych mocy, a pozostałe dwie można obliczyć, np.

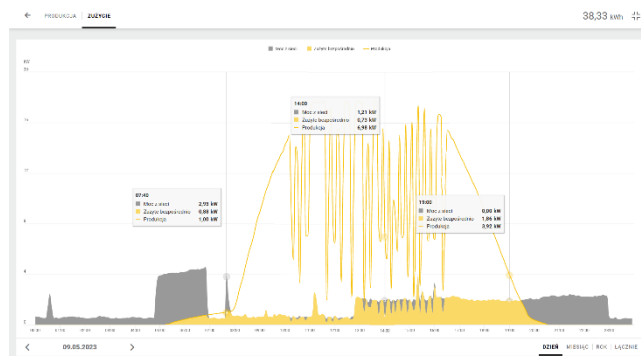
$$(2a) \quad P_{zs} = P_z + P_{ds} - P_p$$

$$(2b) \quad P_{zb} = P_p - P_{ds}.$$

Z pozoru wydaje się [6, 7], że jeśli moc produkowana jest mniejsza niż moc zużywana, to cała moc zużywana bezpośrednio powinna być równa mocy produkowanej, tzn. $P_{zb} = P_p$ i $P_{ds} = 0$. Niestety w systemach trójfazowych może być inaczej, tzn. $P_{zb} < P_p$ i $P_{ds} > 0$ (rys. 5, rys. 6, tabela 1 – dane zarejestrowane w dniu 9. maja 2023 r. o godz. 7:40 przy słonecznej, bezchmurnej pogodzie). Z tym zjawiskiem, wynikającym z nierównomiernego obciążenia sieci trójfazowej, trzeba się pogodzić.



Rys. 5. Produkcja 9. maja 2023 r. (dzień słoneczny, bezchmurny)



Rys. 6. Zużycie 9. maja 2023 r. (dzień słoneczny, bezchmurny)

Tabela 1. Wybrane moce chwilowe w dniu 9. maja 2023 r. – rys. 4 i rys. 5 (dzień słoneczny, bezchmurny)

Moc kW	Chwila pomiaru		
	7:40	14:00	19:00
P_p moc produkowana	1.00	6.98	3.92
P_z moc zużywana	3.81	1.94	1.86
P_{zb} moc zuż. bezp.	0.88	0.73	1.86
P_{zs} moc z sieci	2.93	1.21	0
P_{ds} moc do sieci	0.12	6.25	2.06

Niestety istnieje dość podobne, ale znacznie groźniejsze zjawisko, a mianowicie w sytuacji gdy moc produkowana przez system fotowoltaiczny jest większa od mocy zużywanej i wydaje się, że cała ta moc powinna być zużywana bezpośrednio z produkcji, tak nie jest, bo system fotowoltaiczny znajduje się w stanie dynamicznym, związanym z przygotowaniem do nagłego przerwania produkcji energii ze

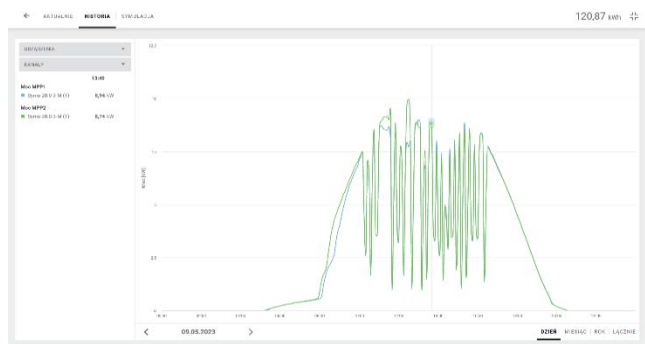
względu na zbyt wysokie napięcie w sieci (rys. 5, rys. 6, tabela 1 – dane zarejestrowane w dniu 9. maja 2023 r. o godz. 14:00 przy słonecznej, bezchmurnej pogodzie). Moc produkowana jest równa $P_p = 6.98$ kW, moc zużywana jest równa $P_z = 1.94$ kW a moc zużywana bezpośrednio zamiast 100 % mocy $P_z < P_p$ jest równa $P_{zb} = 0.73$ kW, czyli zaledwie 38 % mocy P_z . Konsekwencją tego stanu jest pobór z sieci mocy $P_{zs} = 1.21$ kW, przy jednoczesnym dostarczaniu do sieci nadmiernej mocy $P_{ds} = 6.25$ kW. To jest bardzo niekorzystne dla prosumenta, ponieważ:

- system fotowoltaiczny przerywa produkcję energii, redukując wydajność i być może w konsekwencji nie zaspakajając globalnych potrzeb prosumenta, ponadto częste przerywanie produkcji redukuje żywotność falownika
- z sieci niepotrzebnie jest pobierana moc a jednocześnie do sieci jest niepotrzebnie dostarczana nadmierna moc, co oznacza albo stratę energetyczną dla prosumenta (bo bezkosztowo z sieci można odzyskać tylko część wprowadzonej tam energii w przypadku umowy z dostawcą energii elektrycznej typu „net-metering”) albo wręcz bezpośrednio stratę finansową dla prosumenta przy wyższej cenie energii zużywanej z sieci w porównaniu z ceną energii dostarczanej do sieci (przy umowie z dostawcą energii elektrycznej typu „net-billing”).

Należy zauważyć, że jedynie w okresach stabilnej pracy system fotowoltaiczny działa zgodnie z oczekiwaniami, tzn. bezpośrednio jest wykorzystywana cała dostępna moc, np. w dniu 9. maja 2023 r. o godz. 19:00 (rys. 5, rys. 6, tabela 1). Istotnie w tych warunkach moc zużywana z sieci jest równa $P_{zs} = 0$.

Pokazane na rys. 5 i 6 zjawisko wielokrotnego przerywania produkcji przez system fotowoltaiczny w warunkach największego nasłonecznienia (głębokie oscylacje w środkowej części dziennego wykresu pulsu produkcji) jest spowodowane brakiem możliwości absorpcji przez zewnętrzny system elektroenergetyczny całej produkowanej w okolicy energii fotowoltaicznej. „Wpompowywanie” energii do sieci elektroenergetycznej przez system fotowoltaiczny wymaga bowiem wytworzenia przez ten system napięcia (napięć w systemie trójfazowym) wyższego (wyższych) od aktualnego napięcia (napięć) w sieci. Jednak zgodnie z normą PN-IEC 60038:1999 pt. „Napięcia znormalizowane IEC” [8], maksymalne konsumenckie napięcie fazowe nie może przekroczyć 110 % napięcia znamionowego równego 230 V. Zatem dopuszczalne maksymalne napięcie fazowe jest równe 253 V. Przy konieczności wytworzenia wyższego napięcia system fotowoltaiczny musi ograniczyć produkcję energii (np. poprzez zmniejszenie współczynnika mocy (tzw. $\cos \varphi$) lub nawet ją przerwać, co zilustrowano na rys. 7, 8 i 9. Towarzyszą temu duże oscylacje napięć (rys. 8). Zjawisko to pogłębia się z roku na rok wraz ze wzrostem na danym terenie liczby i całkowitej mocy mikro elektrowni fotowoltaicznych oraz wskutek utrzymywania za wysokich napięć zewnętrznej sieci (napięcia sieci na rys. 9 mają w nocy wartości ok. 240 V). Dochodzi do tego, że poszczególne mikro elektrownie „walczą” między sobą o dostęp, uniemożliwiając sobie wzajemnie pełną produkcję energii. Prosumenci coraz częściej otrzymują więc komunikaty o przykładowej treści przedstawionej w tabeli 2.

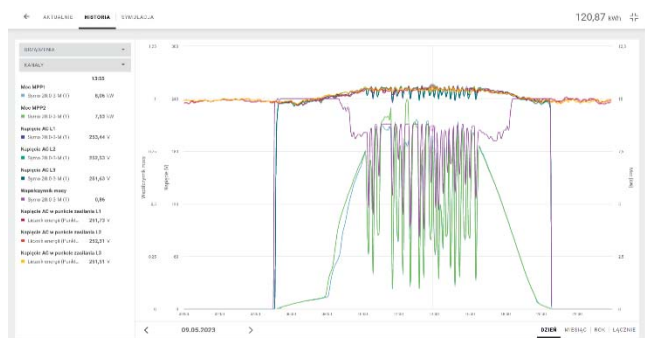
W celu zilustrowania zjawiska coraz bardziej nieregularnej pracy i coraz mniejszej produkcji mikro elektrowni fotowoltaicznych w Polsce, na kolejnych rysunkach (rys. 10 – rys. 13) przedstawiono wykresy produkcji monitorowanej instalacji fotowoltaicznej w ubiegłych latach w dniach analogicznych do dnia 9. maja 2023 r., tzn. w dniach całkowicie bezchmurnych o podobnej długości a więc i o podobnym nasłonecznieniu. Wyprodukowane w tych dniach energie zestawiono w tabeli 3.



Rys. 7. Produkcja obu układów MPP falownika 9. maja 2023 r.



Rys. 8. Napięcia i współczynnik mocy falownika 9. maja 2023 r.



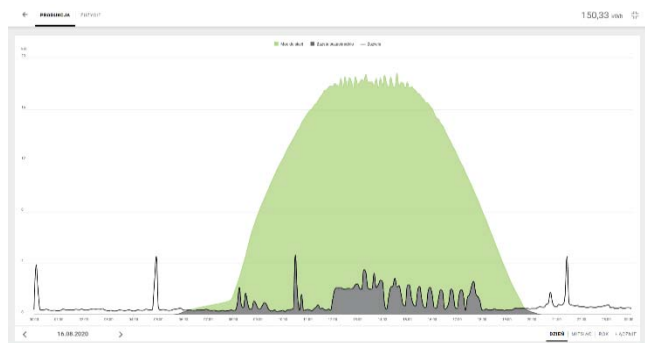
Rys. 9. Dane z rys. 8 wraz z napięciami sieci 9. maja 2023 r.

Tabela 2. Przykładowe powiadomienie o błędach i zdarzeniach od noreply@solarweb.com

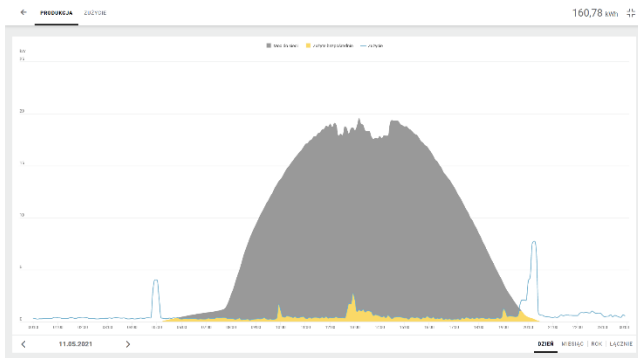
Data	Nazwa urządzenia	Kod stanu	Opis
13.05.2023 15:45:00	Symo 20.0-3-M (1)	102	Napięcie AC zbyt wysokie

Tabela 3. Wyprodukowane energie przedstawione na rys. 10–13

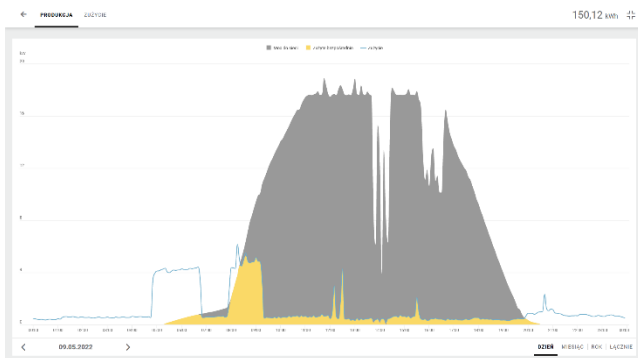
Dzień		16.08.2020	11.05.2021	9.05.2022	9.05.2023
Energia	kWh	150.33	160.78	150.12	120.87
Nr rys.		rys. 10	rys. 11	rys. 12	rys. 13



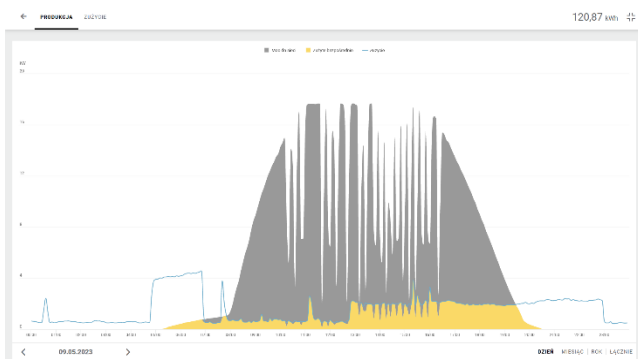
Rys. 10. Produkcja w dniu 16. sierpnia 2020 r.



Rys. 11. Produkcja w dniu 11. maja 2021 r.



Rys. 12. Produkcja w dniu 9. maja 2022 r.



Rys. 13. Produkcja w dniu 9. maja 2023 r.

4. Wnioski końcowe

W pracy przedstawiono analizę i przeprowadzono ocenę efektywności mikro elektrowni fotowoltaicznych w Polsce na przykładzie instalacji zlokalizowanej w Wielkopolsce. Przeprowadzone badania są próbą wyjaśnienia zaskakującego zjawiska powolnego przyrostu produkcji energii elektrycznej w Polsce w stosunku do znacznie szybszego wzrostu zainstalowanej mocy elektrowni w latach 2018–2022 (rys. 2) [2].

Pokazano, że jedną z przyczyn tego zjawiska jest sukcesywne zmniejszanie się efektywności mikro elektrowni fotowoltaicznych w Polsce ze względu coraz liczniejsze przerwy w ich produkcji w bezchmurne dni (rys. 10–rys. 13). Dane zestawione w tabeli 3 wskazują na straty energii narastające od 2021 r. do 2023 r. o nawet 25 %.

Stan ten jest konsekwencją wieloletnich zaniedbań we właściwym rozwoju polskiego systemu elektroenergetycznego a zwłaszcza: za małej przepustowości sieci elektroenergetycznej, nadmiaru przestarzałych elektrowni węglowych o ograniczonych, powolnych i kosztownych możliwościach regulacji mocy, zwiększających ich awaryjność, zre-

zygnowanie z możliwości rozwoju elektrowni gazowych, zbyt powolnego rozwoju transformatorów o zdalnie i szybko regulowanych napięciach oraz z niedorozwoju instalacji magazynujących energię, w tym: elektrowni szczytowo-pompowych, akumulatorowych magazynów energii i elastycznych linii produkcyjnych, których pobór mocy można modulować automatycznie, szybko i elastycznie w zależności od potrzeb.

Dostawcy energii elektrycznej ograniczają więc produkcję mikro elektrowni fotowoltaicznych poprzez utrzymywanie za dużych napięć w sieci, co pokazano na rys. 9 (napięcie bez produkcji fotowoltaicznej 240 V zamiast 230 V).

Z przeprowadzonych analiz wynika więc, że: inwestycje prosumenckie są w znacznym stopniu marnowane (nawet w ok. 25 % według danych tabeli 3). Nowi prosumenci są zniechęceni do inwestycji poprzez coraz gorsze warunki opłacalności proponowanych umów typu „net-billing”, poprzez coraz większe różnice cen energii zużywanej z sieci w porównaniu do energii dostarczanej do sieci (powstał nawet pomysł ujemnej ceny energii dostarczanej do sieci w godzinach szczytu produkcji).

W rezultacie, nie wykorzystuje się potencjalnych możliwości ograniczania produkcji elektrowni węglowych, co oznacza nadmierne koszty spalania węgla, nadmierne obciążenie środowiska i rosnące kary za emisję CO₂ a więc nadal rosnące ceny energii elektrycznej.

Praca została wykonana w projekcie 0211/SBAD/0223.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski, Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, e-mail: adam.dabrowski@put.poznan.pl; prof. UAM dr hab. inż. Agata Dąbrowska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Wydział Chemii, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań, e-mail: agata.dabrowska@amu.edu.pl; dr inż. Marcin Dąbrowski, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, ul. Jana Pawła II 10, 61-139 Poznań, e-mail: mdabrowski@man.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2022 (Photovoltaic market in Poland 2022), <https://ieo.pl/pl/raport-pv-2022>, access: 7.05.2023
- [2] Rekordowa produkcja energii elektrycznej w Polsce w 2022 (Record-breaking electricity production in Poland in 2022), Urząd Regulacji Energetyki, <https://wysokienapiecie.pl/81733-produkcja-energii-elektrycznej-w-polsce/>, access 7.05.2023
- [3] Moc zainstalowanej w Polsce fotowoltaiki przekroczyła 12 GW, Świat OZE, <https://swiatoze.pl/moc-zainstalowanej-w-polsce-fotowoltaiki-przekroczylo-12-gw/>, access: 8.05.2023
- [4] W. Mielczarski, Rynki energii elektrycznej: wybrane aspekty techniczne i ekonomiczne, Agencja Rynku Energii, Energoprojekt-Consulting, 2000, ISBN: 83-87574-35-X
- [5] K. Świrski, Trudna praca bloków węglowych w polskim systemie energetycznym, raport techniczny, 16.01.2017 r., <http://konradswirski.blog.tl.com.pl/trudna-praca-blokow-weglowych-w-polskim-systemie-energetycznym/>, access: 8.05.2023
- [6] M. Sibiński, K. Znajdek, Przyrządy i instalacje fotowoltaiczne, PWN, Warszawa 2016, ISBN 978-83-01-18837-5
- [7] M. T. Sarniak, Systemy fotowoltaiczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019, ISBN 978-83-7814-926-2
- [8] Polska Norma Nr PN-IEC 60038:1999, „Napięcia znormalizowane IEC”