

Charakterystyka jakości energii elektrycznej w zakładzie usług komunalnych współpracującym z mikroinstalacją fotowoltaiczną

Streszczenie. Ze względu na dynamiczny wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii do produkcji energii elektrycznej przez odbiorców końcowych i pojawiające się problemy w eksploatacji takich obiektów konieczne są analizy, których celem jest wskazanie źródła zakłóceń. Niniejszy artykuł porusza problematykę jakości energii elektrycznej w obiektach infrastruktury komunalnej, w którym mikroinstalacja fotowoltaiczna wspomagana siecią elektroenergetyczną pozwala na pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną. Z wykonanych badań wynika, że awaryjne wyłączenia oczyszczalni ścieków powodowane były głównie szybkimi zmianami napięcia. W okresach przejścia magazynu energii ze stanu ładowania akumulatorów na ich rozładowywanie lub odwrotnie, napięcia spadały poniżej 150 V powodując awaryjny stan pracy falowników.

Abstract. Due to the dynamic increase in the use of renewable energy sources for electricity production by final customers and emerging problems in the dispatch of such facilities, analyses are necessary to identify the source of interference. This article addresses the issue of electricity quality in communal facilities where photovoltaic microinstallations assisted by an electricity grid can cover the demand for electricity. The tests carried out show that the emergency shut-down of wastewater was caused by rapid changes in voltage. During periods of energy storage transition from the charging state of the batteries to their unloading or vice versa, the voltages fell below 150 V, causing the inverter to pass in the emergency state of operation. **Characteristics of the electrical energy quality in a municipal service facility cooperating with photovoltaic microinstallation.**

Słowa kluczowe: energia elektryczna, jakość energii, infrastruktura komunalna, siłownia fotowoltaiczna.

Keywords: electricity, energy quality, municipal infrastructure, photovoltaic gym.

Wstęp

W ostatnich latach obserwujemy bardzo dynamiczny rozwój w zakresie wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Szczególnym zainteresowaniem w większości regionów świata cieszą się siłownie fotowoltaiczne wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej. Z danych URE [1] wynika, że w polskim systemie elektroenergetycznym pracuje około 671 instalacji posiadających koncesję na wytwarzanie energii elektrycznej co stanowi 22% wszystkich instalacji OZE a ich moc jest na poziomie 150 MW. Ponadto aktualnie liczba prosumentów przekroczyła już poziom 40 tys., a moc tych instalacji zbliża się do 300 MW, w stosunku do 60 MW mocy zainstalowanych w 2016 r. [2, 3].

Najczęściej system fotowoltaiczny składa się z paneli fotowoltaicznych, falownika i urządzeń pomocniczych niezbędnych do bezpiecznej pracy [4]. W układzie tym za jakość energii odpowiedzialny jest głównie inwerter, ponieważ to on przekształca prąd stały wytworzony w modułach PV na prąd sinusoidalnie zmienny o określonych parametrach [5, 6].

Energia elektryczna wprowadzana do sieci przez system fotowoltaiczny musi spełniać wymagania jakościowe, aby uniknąć zakłóceń w pracy zasilanych nią urządzeń lub w skrajnych przypadkach ich awarii.

Oceny jakości energii elektrycznej należy dokonywać w oparciu o obowiązujące akty prawne. Głównym dokumentem dotyczącym parametrów jakości energii jest norma PN-EN50160 „Charakterystyka napięcia energii elektrycznej dostarczanej przez publiczne sieci elektroenergetyczne” [7]. Parametry opisujące jakość energii dotyczą dwóch głównych zagadnień tj. ciągłości zasilania oraz jakości napięcia. Ciągłość zasilania charakteryzowana jest głównie przez częstotliwość oraz czas trwania przerwy w zasilaniu. Parametry opisujące jakość napięcia to głównie jego częstotliwość, wartość skuteczna, szybkie zmiany poziomu, czy odkształcenie od przebiegu sinusoidalnie zmiennego.

Problem jakości energii elektrycznej wytwarzanej przez odnawialne źródła energii jest analizowany już od wielu lat [8 - 12]. Badania te w większości przypadków dotyczą

jednak ferm wiatrowych oraz wpływu generowanej energii na pracę systemu elektroenergetycznego.

Ze względu na wzrost liczby odbiorców końcowych decydujących się na konsumpcję pozyskanej energii z własnej siłowni fotowoltaicznej konieczne są analizy jej jakości w miejscu wytwarzania. Na efektywność finansową takiego przedsięwzięcia wpływają bowiem nie tylko parametry meteorologiczne i konstrukcyjne siłowni [13-15] ale również jakość generowanej energii. W przypadku bowiem nieprawidłowego działania systemu wytwarzana energia może nie spełniać stawianych jej wymagań, a tym samym zagrażać zasilanym odbiorcom. Z problemem tym mamy do czynienia najczęściej w sytuacji, gdy wytwórca nie przekazuje nadwyżek energii do sieci publicznej a tym samym nie jest świadomy jakim napięciem zasilą swoje odbiorniki. Skutki zasilania odbiorników napięciem o złej jakości bardzo często są widoczne dopiero w dłuższej perspektywie czasu ich eksploatacji.

Cel i zakres pracy

Celem przedstawionego opracowania jest analiza jakości napięcia zasilającego w obiekcie infrastruktury komunalnej, w którym mikroinstalacja fotowoltaiczna wspomagana siecią elektroenergetyczną pozwala na pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną. W pierwszej części pracy scharakteryzowano obiekt badań a następnie dokonano analizy jakości napięcia zgodnie z obowiązującymi wymaganiami. Ze względu na specyfikę obiektu analizy jakości energii dokonano w trzech stanach pracy systemu PV tj. w czasie ładowania i rozładowywania akumulatorów oraz w okresach, w których w/w procesy nie były realizowane.

Wyniki badań

Zakład Usług Komunalnych (ZUK), w którym przeprowadzono badania w okresie od stycznia do października 2017 roku, jest położony na granicy obszaru miejskiego i wiejskiego w południowo-wschodniej części Polski. Oczyszczalnia ścieków jest obiektem pracującym całodobowo, którego średnioroczne zużycie energii elektrycznej jest na poziomie 200 MWh przy średnim dobowym odpływie cieczy równym $Q_{sr} = 806 \text{ m}^3/\text{dobę}$.

Zapotrzebowanie energetyczne obiektu pokrywane jest przez fermę fotowoltaiczną, układ baterii magazynujących energię pochodzącą z nadwyżki pracy fermy, sieć zewnętrzną lub agregat prądowców.

Na obecną infrastrukturę systemu składa się farma fotowoltaiczna produkująca energię elektryczną na pokrycie zapotrzebowania oczyszczalni ścieków. Powstała ona 2015 r. w ramach środków współfinansowanych z projektu Unii Europejskiej. W jej skład oprócz siłowni PV o mocy zainstalowanej $P_m = 100$ kWp wchodzi jeszcze dodatkowe pomieszczenie, w którym znajdują się 144 baterie, każda o pojemności 720 Ah. Niestety ze względu na powstające zakłócenia w czasie pracy systemu, które powodowały przejście układów sterowniczych w stan pracy awaryjny i ograniczenia w pracy oczyszczalni w okresie wykonywania badań moc siłowni PV była ograniczona do 30 kWp. Istniejący automatyczny system pomiarowy działający w oparciu o pakiet SCADA umożliwiał ciągły pomiar i archiwizację parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w poszczególnych stanach pracy systemu tj.: ładowania, rozładowywania oraz okresu spoczynkowego akumulatora energii. Istniejący system pomiarowy został uzupełniony o analizator parametrów sieci Cir e3 wykonujący pomiary w głównej tablicy rozdzielczej, dzięki czemu możliwa była również analiza szybkich zmian napięcia oraz stopnia jego odkształcenia od przebiegu sinusoidalnie zmiennego. Dostępny punkt pomiarowy uniemożliwiał jednak identyfikację źródła, z którego energia elektryczna jest pobierana.

W poniższych tabelach (Tab. 1-4) przedstawiono uzyskane wskaźniki (X_{min} - wartość minimalna, \bar{x} - wartość średnia, X_{max} - wartość maksymalna, V - współczynnik zmienności, N - udział obserwacji niespełniających wymagań) charakteryzujące parametry jakości energii elektrycznej w poszczególnych stanach pracy systemu.

Tabela 1. Charakterystyka jakości energii w czasie bezczynności akumulatora energii

Zmienna	Statystyki opisowe				
	X_{min}	\bar{x}	X_{max}	V [%]	N [%]
U1 [V]	0	238	258	1,2	0,02
U2 [V]	0	239	256	1,4	0,03
U3[V]	0	239	257	1,3	0,02
K_{2U} [%]	0,02	0,47	10,12	53,6	0,15
f [Hz]	48,41	50,00	53,00	0,3	0,03

Tabela 2. Charakterystyka jakości energii w czasie ładowania akumulatora energii

Zmienna	Statystyki opisowe				
	X_{min}	\bar{x}	X_{max}	V [%]	N [%]
U1 [V]	198	239	258	1,42	0,01
U2 [V]	197	240	263	1,62	0,02
U3[V]	201	241	263	1,57	0,02
K_{2U} [%]	0	0,47	9,95	81,63	1,33
f [Hz]	48,18	50,00	53,14	0,22	0,28

Tabela 3. Charakterystyka jakości energii w czasie rozładowywania akumulatora energii

Zmienna	Statystyki opisowe				
	X_{min}	\bar{x}	X_{max}	V [%]	N [%]
U1 [V]	196	242	263	1,66	0,04
U2 [V]	206	242	271	1,76	0,06
U3[V]	195	242	266	2,12	0,04
K_{2U} [%]	0,02	0,49	11,54	181,6	6,22
f [Hz]	48,66	50,03	53,14	0,59	2,62

Z wykonanych analiz wynika, że w badanym obiekcie średnie 10-cio minutowe wartości skuteczne napięcia zasilającego (U1, U2, U3) oscylowały od 186 V do 271 V.

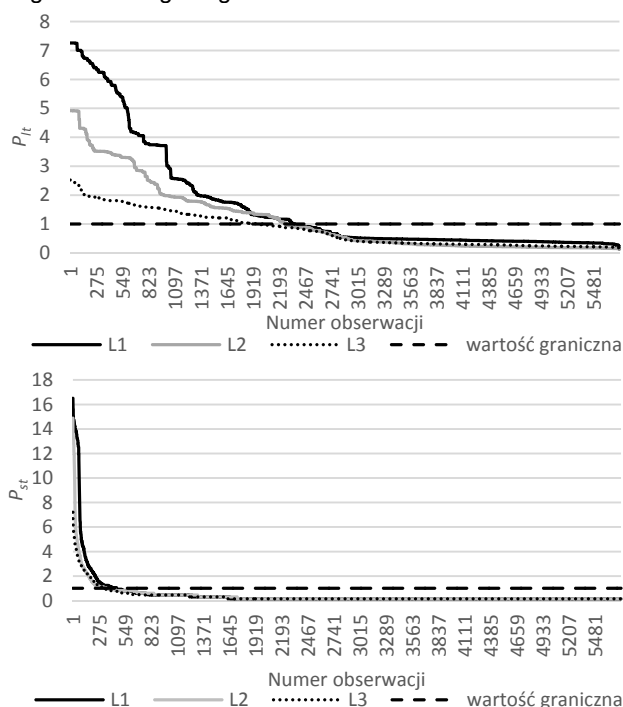
Pojedyncze obserwacje przekraczały dopuszczalny zakres zmian (207 – 253 V) jednak brak jest podstaw do stwierdzenia, że napięcie nie spełnia stawianych mu wymagań, ponieważ liczba zakłóceń była znacznie niższa niż 10% obserwacji.

Zaobserwowano natomiast występowanie znacznej asymetrii napięć zasilających, a wyznaczony współczynnik asymetrii K_{2U} osiągał nawet poziom 11,54 %. Poszczególne stany pracy charakteryzowały się zbliżoną średnią wartością współczynnika asymetrii na poziomie nie przekraczającym 0,5%. Natomiast poszczególne obserwacje w okresie rozładowywania, a szczególnie w pozostałym czasie pracy charakteryzowały się znaczną jego zmiennością. W ostatnim z analizowanych w pracy okresów tj. ładowania akumulatorów obserwacje poza dopuszczalnym poziomem stanowiły aż 6 %. W tym czasie występowały również zakłócenia dotyczące częstotliwości (f) napięcia zasilającego. W ponad 2 % rejestrowanych wartości częstotliwość nie spełniała stawianych wymagań a jej wartości oscylowały w przedziale od 48,18 Hz do 53,14 Hz.

Tabela 4. Charakterystyka wskaźników krótko- (P_{st}) i długookresowego (P_{fl}) migotania światła

Wskaźnik	$P_{fl L1}$	$P_{fl L2}$	$P_{fl L3}$	$P_{st L1}$	$P_{st L2}$	$P_{st L3}$
\bar{x}	1,63	1,13	0,8	0,51	0,39	0,34
V [%]	115,31	104,61	75,78	308,1	237,39	176,58
N [%]	40,76	39,34	34,68	7,96	6,06	5,91

Pomimo faktu, że średnie wartości skuteczne napięcia zasilającego w okresach 10-cio minutowych spełniły stawiane im wymagania (Tab. 1-3) to jednak w badanym obiekcie występował problem z jego wahaniami (Tab. 4). Wyznaczone średnie wartości wskaźnika długookresowego migotania światła (P_{fl}) dla dwóch spośród analizowanych faz przekraczały wartość progową wynoszącą 1. O dużej uciążliwości szybkich zmian napięcia świadczy fakt, że w ponad 40% obserwacji wartości wskaźnika długookresowego migotania przekraczała wartość dopuszczalną. Na wykresie (Rys. 1) pokazano przebieg zmian uporządkowanych wskaźników krótko- i długookresowego migotania światła.

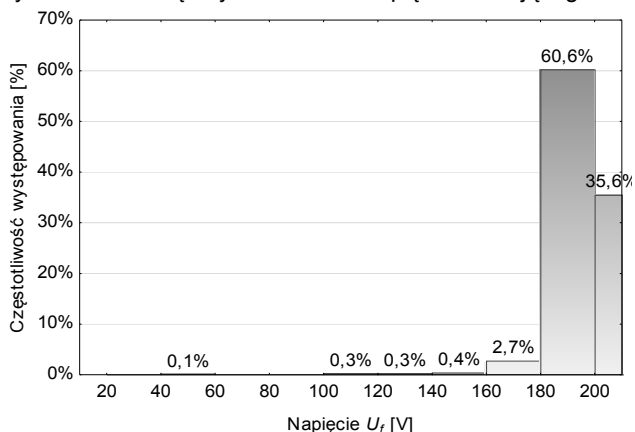


Rys. 1. Przebiegi zmian wskaźnika krótko- i długookresowego migotania światła

Z wykonanych analiz wynika, że wartość wskaźnika długookresowego migotania światła jest znacznie zróżnicowana pod względem jego poziomu w poszczególnych fazach. Najwyższe wartości przekraczające 7 występowały w fazie 1. Natomiast niższe wartości maksymalne (odpowiednio 5 i 2,5) obserwowano w fazie 2 i 3. Wszystkie fazy natomiast charakteryzowały się zbliżonym udziałem obserwacji przekraczającym dopuszczalny poziom.

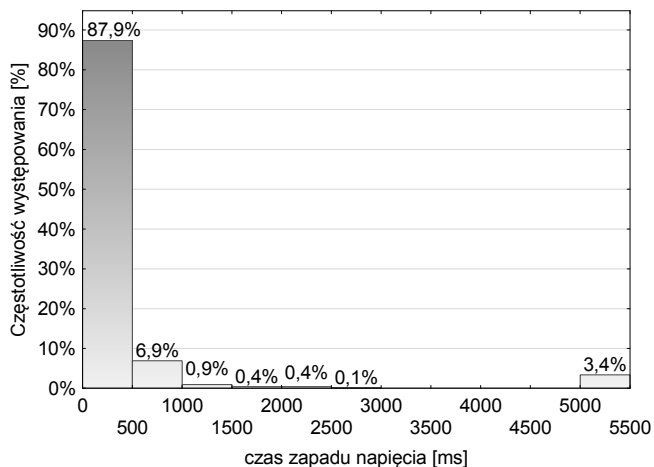
Odmienne przedstawiała się natomiast zmienność krótkookresowego migotania światła. Rejestrowane wartości były ponad dwukrotnie wyższe, lecz udział obserwacji przekraczających wartość graniczną był znacznie niższy niż dla wskaźnika długookresowego.

Wartości wskaźnika migotania światła są uzależnione od poziomu napięć zasilających. W dalszej części pracy wykonano analizę szybkich zmian napięcia zasilającego.



Rys. 2. Charakterystyka poziomu zapadów napięcia zasilającego

Głównym źródłem zakłóceń w badanym obiekcie był rozruch silników dużej mocy oraz zmiany stanów pracy baterii akumulatorów z ładowania na rozładowywanie. W czasie badania najczęściej występowały zapady napięcia w przedziale od 180 do 207 V (Rys. 2). Stanowiły one aż 96% wszystkich rejestrowanych zakłóceń. Zapady napięcia były więc o stosunkowo niskim poziomie, lecz zasilanie odbiorników napięciem o wartości poniżej 180 V (4% obserwacji) może już powodować zakłócenia w ich pracy. W miejscu badania zapady napięcia najczęściej powodowały przejście falowników wykorzystywanych do sterowania pracą silników w awaryjny stan pracy.



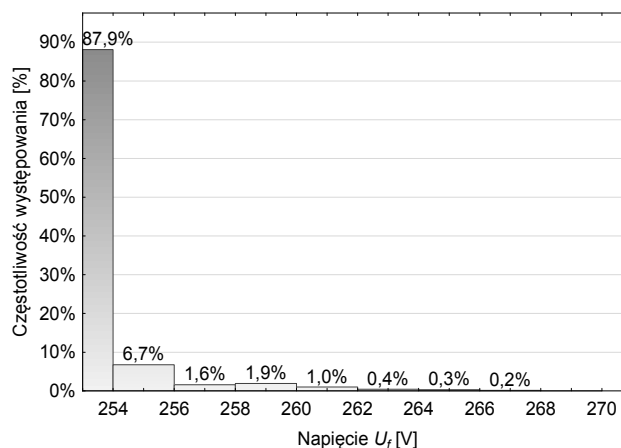
Rys. 3. Charakterystyka czasu trwania zapadów napięcia zasilającego

Skutki powodowane zapadem napięcia są uzależnione nie tylko od jego głębokości, ale również od czasu jego

trwania. Kolejnym z analizowanych parametrów zapadu napięcia był więc czas ich trwania (Rys. 3). Najwyższy udział (88%) stanowiły zapady napięcia o bardzo krótkim czasie trwania do 500 ms. Niestety, ale występowały również zakłócenia trwające dłużej niż 5 s (3% obserwacji). Przeciętna głębokość zapadów napięcia o najdłuższym czasie trwania była na poziomie 190 V. Z wykonanych analiz wynika również, że zakłócenia bardzo często nie występowały jednocześnie we wszystkich fazach napięcia zasilającego. Najczęściej rejestrowane one były w fazie 2 i 3.

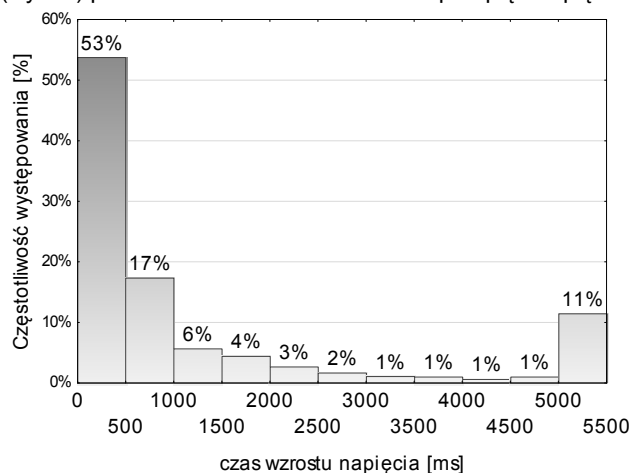
Kolejnym z analizowanych parametrów jakości napięcia zasilającego były krótkotrwałe wzrosty napięcia zasilającego. Niekorzystne warunki dla pracy odbiorników energii elektrycznej występują bowiem nie tylko w czasie zasilania ich napięciem o wartości niższej od znamionowej, ale również wyższym od niego.

W trakcie badań najczęściej rejestrowanych przebiegów (88% obserwacji) miało wartość niższą niż 254 V co świadczy o nieznacznym przekroczeniu wartości granicznej (Rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyka poziomu przebiegów napięcia zasilającego

Skutki jakie powoduje zasilanie odbiorników napięciem o wartości wyższej od znamionowej takie jak skrócenie czasu pracy żarowych źródeł światła, wzrost temperatury elementów grzejnych czy zwiększenie mocy generowanej przez baterię kondensatorów, zależą nie tylko do wartości przebiegu, ale i czasu jego trwania. Na poniższym rysunku (Rys. 5) pokazano rozkład czasu trwania przebiegów napięcia.



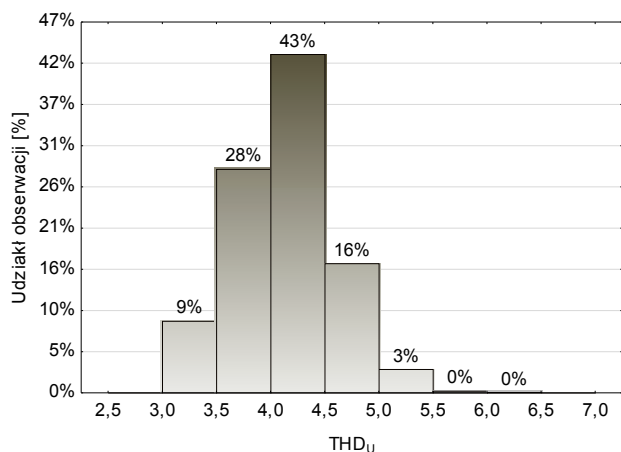
Rys. 5. Charakterystyka czasu trwania przebiegów napięcia zasilającego

W badanym obiekcie najczęściej występowały przebiegi trwające do 500 ms. Pomimo faktu, że zakłócenia te nie trwały długo oddziałują one również

niekorzystnie na pracę szczególnie silników, które są głównymi odbiorcami energii w oczyszczalni ścieków. Każdorazowa zmiana napięcia wpływa na zmianę charakterystyki momentu co przy stałym obciążeniu napędzanych urządzeń powoduje niestabilną pracę układu, objawiającą się głównie drganiami całego zespołu. Niestety duży udział (11%) stanowiły również zakłócenia trwające dłużej niż 5 s.

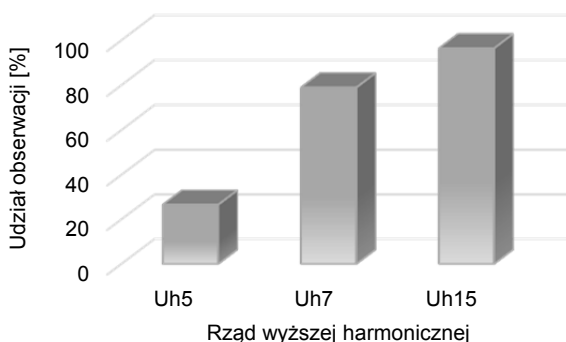
Przebiegi podobnie jak zapady napięcia nie miały charakteru trójfazowego. Głównie występowały one w fazie drugiej (59%) i trzeciej (39%).

Ostatnim z analizowanych parametrów było odkształcenie przebiegu napięcia od sinusoidalnie zmiennego. Rozkład częstości występowania poziomów wskaźnika $THDU$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Charakterystyka poziomu odkształcenia napięcia zasilającego

Pomimo faktu, że żadna z rejestrowanych średnich wartości współczynnika $THDU$ nie przekraczała dopuszczalnego poziomu 8% a jego wartość przeciętna w okresie objętym analizą wynosiła 3,3% występował problem z wyższymi harmonicznymi napięcia. W badanym obiekcie występowały bowiem przekroczenia wartości granicznych poszczególnych wyższych harmonicznymi. Przekroczenia te dotyczyły harmonicznymi rzędu 5, 7 i 15 (Rys. 7).



Rys. 7. Charakterystyka częstości występowania wyższych harmonicznymi napięcia

Podsumowanie

Z wykonanych analiz wynika, że w obiekcie podstawowy problem w zakresie jakości energii elektrycznej są: wahania napięcia, jego asymetria oraz zmiany częstotliwości. Zasilanie odbiorców energii elektrycznej takim napięciem powodowało częste ograniczenia w pracy oczyszczalni ścieków poprzez przechodzenie urządzeń sterujących (falowników) w awaryjny stan pracy. Zjawiska te

powodowane były prawdopodobnie stanami przejściowymi pracy systemu fotowoltaicznego pomiędzy ładowaniem a rozładowywaniem akumulatorów.

W celu potwierdzenia przypuszczenia, że źródłem zakłóceń są stany przejściowe w przyszłości planowane są badania jakości energii w obiekcie po jego wyłączeniu. Jeśli eliminacja akumulatora z systemu ograniczy zakłócenia jakości energii, podjęte będą działania nad modyfikacją układu sterującego jego pracą.

Podziękowania

Ta praca badawcza była finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autor: dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: krzysztof.nECKA@urk.edu.pl;
 dr hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jaroslaw.knaga@urk.edu.pl;
 Dawid Maciejewski, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: dawid.maciejewski@urk.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Potencjał krajowy OZE w liczbach. www.ure.gov.pl.
- [2] Polskie Towarzystwo Fotowoltaiki. <https://pv-polska.pl/>.
- [3] Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2019. Instytut Energetyki Odnawialnej.
- [4] Hernández-callejo L., Gallardo-saavedra S., Alonso-gómez V., A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance, *Sol. Energy*. 188 (2019) 426–440. doi:10.1016/j.solener.2019.06.017.
- [5] Grycan W., Brusilowicz B., Kupaj M., Photovoltaic farm impact on parameters of power quality and the current legislation, *Sol. Energy*. 165 (2018) 189–198. doi:10.1016/j.solener.2018.03.016.
- [6] Rampinelli G.A., Gasparin F.P., Bühler A.J., Krenzinger A., Assessment and mathematical modeling of energy quality parameters of grid connected photovoltaic inverters, 52 (2015) 133–141. doi:10.1016/j.rser.2015.07.087.
- [7] EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
- [8] Elkholy A., Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems, *Sol. Energy*. 183 (2019) 315–326. doi:10.1016/j.solener.2019.03.009.
- [9] Infield D.G., Onions P., Simmons A.D., Smith G.A., Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters. *IEEE Trans. Power Del.* 19 (4), (2004), 1983–1989.
- [10] Kocatepe C., Inan A., Arkan O., Yumurtaci R., Kekezoglu B., Baysal M., Bozkurt A., Akkaya Y., Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 9 (13), (2009), 2553–2561
- [11] Oliva A.R., Balda J.C., McNabb D.W., Richardson R.D., Power-quality monitoring of a PV generator. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2 (13), (1998), 188–193.
- [12] Oliva A.R., Balda J.C. A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519. *IEEE Trans. Power Del.* 2 (18), (2003), 525–530.
- [13] Korzeniewska E., Drzymała A., Elektrownie fotowoltaiczne aspekty techniczne i ekonomiczne, *Przegląd Elektrotechniczny* 12 (2013) 324-327.
- [14] Nęcka K., Knaga J., Analiza rentowności siłowni PV w zależności od warunków meteorologicznych, konstrukcyjnych i ekonomicznych siłowni. *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2016). 97-100. doi:10.15199/48.2019.01.25
- [15] Nęcka K., Lis S., Drózd T., Oziębłowski M., Kielbasa P., Tomasiak M., Ostafin M., Nawara P., Characteristics of photovoltaic power unit under variable meteorological conditions, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016). 105-108 doi:10.15199/48.2016.12.27.