

doi:10.15199/48.2025.01.44

Analiza wpływu wielkości falownika na ilość i jakość generowanej energii elektrycznej

Streszczenie. Celem prezentowanych badań było określenie wpływu obniżenia mocy znamionowej falownika względem mocy DC generatora PV w P_{MPP} na ilość i jakość generowanej energii elektrycznej. Praca swym zakresem obejmowała analizę zmian ilości energii elektrycznej na wyjściu z falownika w zależności od jego wielkości w odniesieniu do P_{MPP} siłowni PV. Z wykonanych badań wynika, że wykorzystanie mocy znamionowej falownika jest bardzo niskie. Moc wyjściowa przekraczająca 70% mocy znamionowej wystąpiła zaledwie przez 11% czasu realizacji obserwacji. Obniżenie mocy znamionowej falownika do 0,8 mocy DC generatora PV nieznacznie, bo tylko średnio o ok. 0,2% obniżyło uzysk energii. Należy rozważyć obniżenie mocy falownika do 0,6 mocy DC PV w P_{MPP} , powodujące obniżenie ilości generowanej energii o ok. 9% (w okresie letnim). Dodatkowo obniżenie uzysku energii w pikach, zostanie zrekompensowane wzrostem sprawności pracy falownika a dodatkowo poprawi jakość energii elektrycznej ograniczając poziom szybkich zmian napięcia.

Abstract. The purpose of the presented research was to determine the effect of reducing the rated power of the inverter relative to the DC power of the PV generator in the PMPP on the quantity and quality of the generated electricity. The scope of the work included an analysis of changes in the amount of electricity output from the inverter as a function of its size with respect to the PMPP of the PV power plant. The study shows that the use of the rated power of the inverter is very low. Output power exceeding 70% of the rated power occurred for only 11% of the observation execution time. Reducing the rated power of the inverter to 0.8 of the DC power of the PV generator slightly, by only about 0.2% on average, reduced the energy yield. Consider lowering the inverter power rating to 0.6 of the DC power of the PV generator in the PMPP, resulting in a reduction in energy yield of about 9% (during the summer). In addition, the reduction in energy yield in peaks, will be compensated by an increase in the efficiency of the inverter and, in addition, will improve the quality of electricity by reducing the level of rapid voltage changes. (**Analysis of the effect of inverter size on the quantity and quality of generated electricity**).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, siłownia fotowoltaiczna, wielkość falownika, uzysk energii elektrycznej.

Keywords: power quality, photovoltaic power plant, inverter size, electricity yield.

Wstęp

W ostatnich latach obserwujemy dynamiczne zmiany na światowym rynku energii. Widoczny jest na nim wpływ interakcji czynników społecznych, gospodarczych jak i politycznych. Niepewność i problemy z dostępnością surowców energetycznych przyczyniły się do destabilizacji, czego następstwem był dynamiczny wzrost cen. Destabilizacja rynku energii, spowodowała, że np. cena gazu ziemnego w holenderskim hubie TTF w okresie od lutego do sierpnia 2022 r. wzrosła z 70 EUR·MWh⁻¹ do 349 EUR·MWh⁻¹ [1]. Wzrost cen nastąpił również w przypadku pozostałych nośników energii [2]. Obecnie ceny nośników energii ulegają stabilizacji na poziomie w niektórych przypadkach niższym niż na początku roku 2022. Pomimo trudnej sytuacji w jakiej znajduje się sektor energii naciski na działania w kierunku uzyskania bezemisyjnego systemu elektroenergetycznego nie osłabną w najbliższym czasie ponieważ konsekwentnie realizujemy przyjęte założenia [3], [4]. Uzyskanie założonego celu jest możliwe m.in. poprzez wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Taki sposób zaspokajania potrzeb energetycznych w obecnej sytuacji powala również na wzrost uniezależnienia się od importu surowców energetycznych. Dodatkowo dynamiczny rozwój tej gałęzi energetyki jest możliwy przez wzrost konkurencyjności kosztowej aktualnie stosowanych rozwiązań. Osiągnęły one bowiem rozwój technologii pozwalający na generację energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych przy niższym koszcie jednostkowym niż dla systemów opartych na źródłach kopalnych [5]. Na większości rynków systemy fotowoltaiczne (0,048 USD·kWh⁻¹) i energetyka wiatrowa (0,033 USD·kWh⁻¹ - lądowa energetyka wiatrowa; 0,075 USD·kWh⁻¹ - energetyka wiatrowa na morzu) stanowią obecnie najtańsze dostępne źródła energii elektrycznej. Impulsem do zwiększenia wykorzystania energii pozyskanej z OZE jest wysoka cena uprawnień do emisji zanieczyszczeń. Od roku 2022 cena za emisję tony CO₂ oscyluje wokół poziomu 80 EUR·t⁻¹ [6]. Zdaniem analityków w roku 2024 może ona osiągnąć nawet poziom 94 EUR·t⁻¹ [7]. Dynamiczny jednak

rozwój systemów energetyki odnawialnej a w szczególności siłowni fotowoltaicznych powoduje problemy z zapewnieniem standardów jakości energii elektrycznej szczególnie w sieci dystrybucyjnej [8-10].

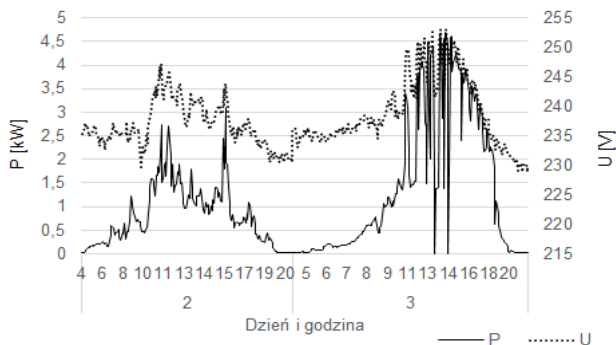
Cel i zakres pracy

Celem pracy była analiza wpływu obniżenia wielkości mocy znamionowej falownika względem mocy DC generatora PV w P_{MPP} na ilość i jakość generowanej energii elektrycznej. Praca swym zakresem obejmowała analizę zmian ilości energii elektrycznej na wyjściu z falownika w zależności od jego wielkości w odniesieniu do P_{MPP} siłowni PV. W pracy analizowano zmniejszenie mocy znamionowej falownika w zakresie do 40% mocy generatora DC. Analiza dotyczyła również zmian jakości energii elektrycznej generowanej przy zmianie stopnia wykorzystania mocy falownika. Analizy wykonano na podstawie badań wykonanych w sześciu punktach przyłączenia instalacji PV do sieci publicznej na terenie małopolski. Rejestracja parametrów opisujących ilość i jakość energii trwała przez minimum tygodni.

Wyniki badań

Ze względu na zmiany w ilości dostępnej energii z konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną zarówno w okresie dobowym jak i rocznym bardzo często mamy do czynienia z przewagą ilości produkowanej energii nad jej chwilowym zapotrzebowaniem. W tej sytuacji falownik chcąc przekazać energię do sieci zwiększa wartość napięcia (Rys. 1). W skrajnych przypadkach, które niestety występują coraz częściej, dochodzi do sytuacji, kiedy ze względu na przekroczenie dopuszczalnego poziomu napięcia falownik musi zostać odłączony od sieci. Zgodnie z normą PN-EN 50160:2010 [11] i rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. [12] 95 % obserwacji ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznego napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale odchyłań $\pm 10\%$ napięcia znamionowego.

Natomiast zgodnie z wymaganiami normy niemieckiej DIN VDE 0126-1-1: 2013-08 [13], każdorazowe przekroczenie napięcia 260V powoduje natychmiastowe odłączenie falownika od sieci elektroenergetycznej.



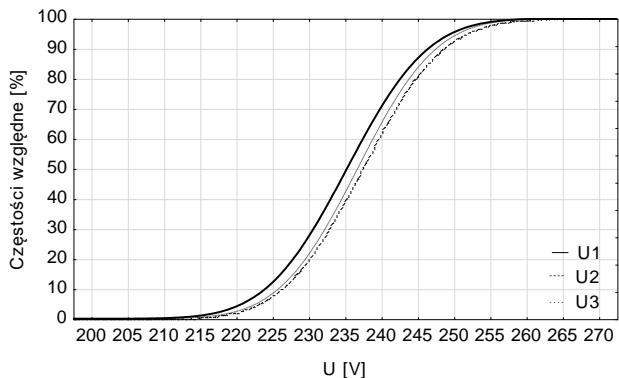
Rys.1. Wpływ wielkości generowanej mocy na poziom napięcia w sieci

Z wykonanych badań na przełomie maja i czerwca w 6 miejscach przyłączenia siłowni PV do sieci publicznej na terenie województwa małopolskiego wynika, że wraz ze wzrostem stopnia wykorzystania mocy falownika zwiększa się wartość napięcia w sieci (Tab. 1).

Tabela 1. Wpływ stopnia obciążenia falownika na poziom napięcia w sieci

Stopień wykorzystania mocy znamionowej falownika [%]	U_{min} [V]	U_{sr} [V]	U_{max} [V]	V [%]
do 10%	201	230	253	2,3
11%-30%	207	235	253	2,6
31%-70%	213	243	259	2,4
pow. 71%	231	250	263	1,6

W badanych obwodach ok. 4-6% obserwacji było na poziomie wyższym niż dopuszczalny. Z dystrybuant empirycznych napięć fazowych w poszczególnych fazach przedstawionych na rysunku 2 wynika, że w analizowanych punktach pomiarowych napięcie było na poziomie ok. 235V a napięcia o wartościach powyżej 253V stanowiły 3-6%. Dla większości więc obwodów wymaganie mówiące o utrzymaniu napięcia przez 95% czasu trwania tygodnia na poziomie $U_n \pm 10\%$ było spełnione. Niestety dołączenie kolejnych źródeł wytwórczych przy aktualnym stanie sieci może spowodować przekroczenie wymagań normatywnych.

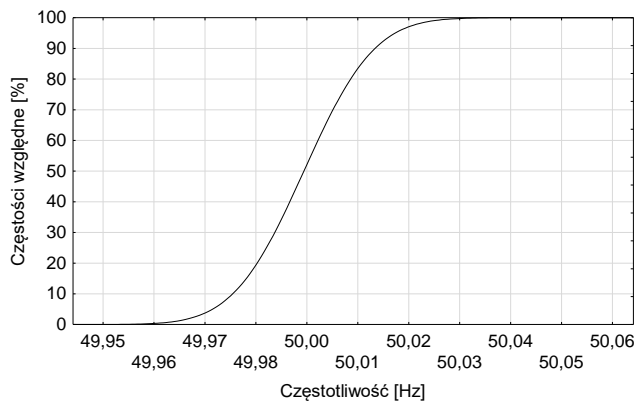


Rys. 2. Dystrybuanty empiryczne napięć w poszczególnych fazach

Wzrost napięcia powyżej wartości granicznej powodował wyłączenie falownika i przerwę konwersji energii pomimo sprzyjających warunków meteorologicznych. W badanych

instalacjach czas przerw wynosił średnio kilka minut a rejestrowane średnie napięcie dla trzech faz bezpośrednio przed wyłączeniem było na poziomie 251V. Zatrzymanie konwersji energii elektrycznej w falowniku powodowało lokalnie obniżenie napięcia do 247V. Niestety, ale wznowienie konwersji napięcia stałego na sinusoidalnie zmienne powodowała powrót napięcia do poziomu powyżej 250V.

W dalszej części pracy analizowano wpływ stopnia obciążenia falownika na zmiany częstotliwości generowanego napięcia i jego asymetrię.



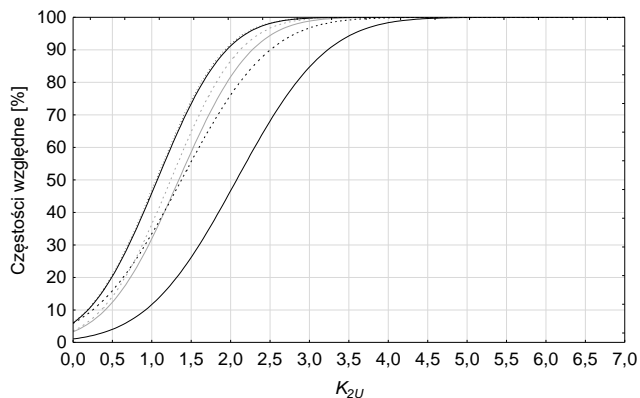
Rys.3. Dystrybuanty empiryczne częstotliwości napięcia

Z badania wynika, że częstotliwość napięcia była na stałym poziomie a wartość średnia zarejestrowanych pomiarów wynosiła $49,99 \pm 0,02$ Hz niezależnie od stopnia obciążenia falownika (Rys. 3). Kolejnym z parametrów opisujących jakość napięcia była jego asymetria. Wartość współczynnika asymetrii K_{2U} wyliczono zgodnie z normą [14] i analizowano jego wartość w zależności od stopnia obciążenia falownika (Tab. 2).

Tabela 2. Wpływ stopnia obciążenia falownika na poziom współczynnika asymetrii napięcia w sieci

Stopień wykorzystania mocy znamionowej falownika [%]	K_{2U} [%]	V [%]
do 10%	1,25	0,41
11%-30%	1,46	0,41
31%-70%	1,45	0,36
pow 71%	1,35	0,31

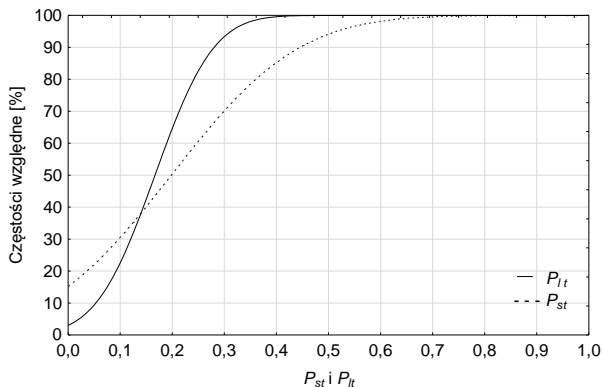
Przeprowadzona analiza nie wskazała jednoznacznego wpływu stopnia obciążenia falownika na wartość asymetrii napięcia w sieci. Zaobserwowano jednak, że wskaźnik ten był na wysokim poziomie i wielokrotnie przekraczał wartość graniczną 2% (Rys. 4).



Rys.4. Dystrybuanty empiryczne asymetrii napięć dla poszczególnych punktów pomiarowych

W jednym z analizowanych punktów pomiarowych dla ponad połowy obserwacji nie było spełnionego wymagania a wartości maksymalne osiągały poziom 7%. Dla pozostałych udział obserwacji przekraczających dopuszczalny próg był na poziomie od 10 do 25%. Celowe są więc dalsze działania w celu dynamicznego rozdzielenia mocy na wyjściu z falownika na poszczególne fazy w zależności od parametrów jakości energii które je charakteryzują. Działanie to pozwoli na poprawę jakości energii elektrycznej w sieci publicznej a dodatkowo pozwoli na wprowadzanie energii do poszczególnych faz sieci w zależności od ich parametrów pracy.

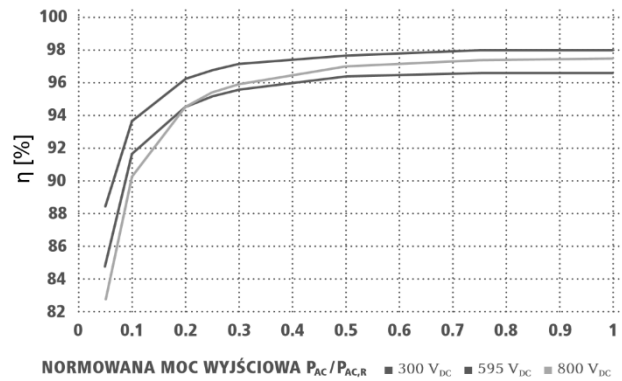
Badaniem objęto również wskaźnik migotania światła. Analizowano zarówno wskaźnik krótko (P_{st}) jak i długookresowego (P_{lt}) migotania światła. Zgodnie z normą IEC 61000-3-3 dla sieci niskiego napięcia graniczne wartości tych parametrów wynoszą odpowiednio 1 i 0,65. Natomiast międzynarodowa norma EN-50160 określa limit parametru P_{lt} , który dla 95% pomiarów w ciągu każdego tygodnia nie może przekraczać wartości wynoszącej 1. Z wykonanych badań wynika, że wymaganie to we wszystkich obiektach było spełnione. Poziom graniczny był przekraczany sporadycznie lecz wartości maksymalne osiągały poziom 2,2 dla P_{st} i 3,4 dla P_{lt} . W większości przypadków wartość wskaźnika krótkookresowego migotania światła była poniżej 0,6 a długookresowego poniżej 0,4.



Rys.5. Charakterystyka wskaźników migotania światła

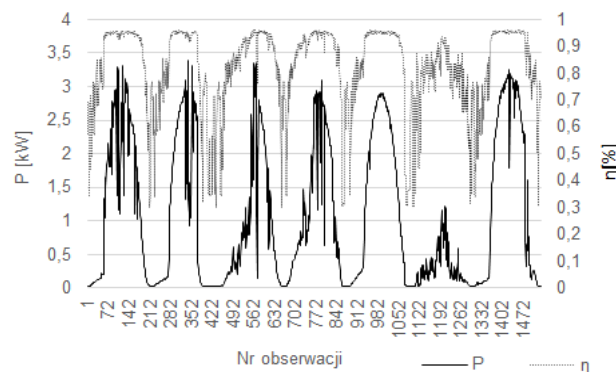
Z wykonanej analizy wynika, że wymagania normatywne odnośnie szybkich zmian napięcia charakteryzowane przez wskaźnik migotania światła spełniają stawiane im wymagania. Poziom graniczny był przekraczany sporadycznie lecz wartości maksymalne osiągały poziom 2,2 dla P_{st} i 3,4 dla P_{lt} . W większości jednak przypadków wartość wskaźnika krótkookresowego migotania światła była poniżej 0,6 a długookresowego poniżej 0,4. Natomiast średnie wartości wskaźników wynosiły odpowiednio 0,18 i 0,21.

W czasie badań zaobserwowano, że wzrost napięcia występujący w jednej fazie powyżej wartości granicznej, nie powoduje ograniczeń w pracy falownika. Wartości maksymalne przekraczały w pojedynczych fazach nawet poziom 260V. Niestety ale większość falowników nie daje możliwości dynamicznego rozdzielenia mocy na poszczególne fazy i sterowania jej poziomem z uwzględnieniem jakości energii elektrycznej. Celowe jest więc odpowiedni dobór mocy falownika do mocy generatora DC. Na rysunku 6 pokazano zmiany sprawności konwersji energii w falowniku firmy Fronius w zależności od stopnia jego obciążenia. Na sprawność konwersji ma wpływ również wielkość napięcia na jego wejściu ale widzimy, że w każdym przypadku praca z mocą poniżej 0,3 mocy znamionowej powoduje znaczne ograniczenie sprawności. Najniższa sprawność występuje przy obciążeniu poniżej 0,1 mocy znamionowej.



Rys.6. Wpływ stopnia obciążenia falownika na sprawność konwersji energii [16]

Na rysunku 7 przedstawiono rzeczywiste zmiany sprawności konwersji energii w falowniku w zależności od mocy na jego wyjściu. Jest to przykład dla jednej z badanych siłowni, w której moc znamionowa falownika wynosiła 3,7kW.



Rys.7. Wpływ poziomu mocy na wyjściu falownika na sprawność konwersji energii

Z wykonanej analizy wynika, że rzeczywista sprawność konwersji energii w falowniku w okresie objętym badaniem zmieniała się od 29% do 96%. Na rysunku 3 widoczne jest obniżenie sprawności konwersji energii w okresie pracy falownika przy niskim wykorzystaniu jego mocy znamionowej. Szczegółowe wyniki analizy dla badanych obiektów z podziałem na przedziały wykorzystania mocy falownika zestawiono w tabeli 3.

Szczegółowa analiza sprawności potwierdziła teoretyczną charakterystykę sprawności falownika przedstawioną na rysunku 6. Największe różnice zaobserwowano w zakresie do 10% mocy znamionowej falownika. Zgodnie z deklaracją producenta sprawność w tym zakresie powinna być na poziomie powyżej 80% a z badań wynika, że jest o 20% niższa. W tym zakresie pracy sprawność charakteryzowała się największą zmiennością na poziomie powyżej 30%, gdy dla pozostałych przedziałów była niższa niż 3%.

Tabela 3. Wpływ stopnia obciążenia falownika na sprawność konwersji energii

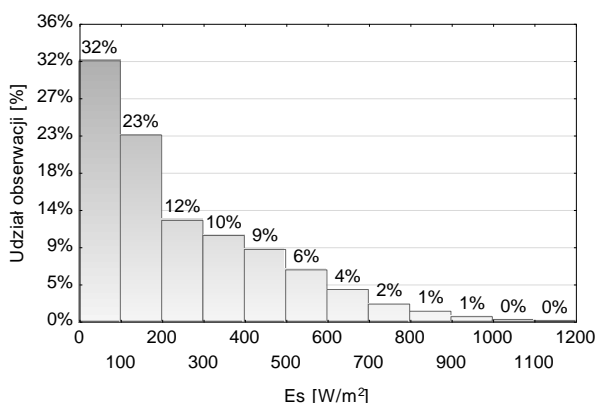
Stopień wykorzystania mocy znamionowej falownika [%]	η_{sr} [%]	V [%]
do 10%	0,64	32,47
11%-30%	0,93	2,82
31%-70%	0,95	0,98
pow 71%	0,97	0,76

Duża różnica w sprawności konwersji energii w zależności od obciążenia falownika była podstawą analizy częstości występowania obciążeń w poszczególnych przedziałach, której wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Częstość występowania obciążeń w poszczególnych przedziałach mocy

Stopień wykorzystania mocy znamionowej falownika [%]	Częstość występowania obciążeń w zależności od stosunku mocy falownika (P_{fn}) do mocy siłowni PV (P_{MPP}) [%]			
	P_{Fn} / P_{MPP}			
	1	0,8	0,6	0,4
do 10%	42,0	38,8	34,3	28,5
11%-30%	23,0	20,5	18,5	16,7
31%-70%	24,0	21,4	20,7	17,5
pow. 71%	11,0	19,3	26,5	37,2
ΔE_{el} [%]	100	99,8	91,3	74,6

W czasie badań większość obserwacji (42%) było w przedziale do 10% mocy znamionowej falownika a zaledwie 11% obserwacji zawierało się w najwyższym przedziale mocy. Warto zaznaczyć, że badania realizowano w miesiącach maj - czerwiec, czyli okresie o dobrych warunkach solarnych. Dla całego roku można się spodziewać jeszcze większego udziału obserwacji w tym czasie w najniższych przedziałach analizowanych mocy. Na rysunku 8 pokazano częstotliwość występowania natężenia promieniowania słonecznego w poszczególnych przedziałach dla danych wioletelnych w miejscu lokalizacji analizowanych siłowni PV.



Rys.8. Histogram częstości występowania natężeń promieniowania słonecznego w poszczególnych przedziałach

Podsumowanie

Z wykonanych badań na wybranych siłowniach PV wynika, że wykorzystanie mocy znamionowej falownika jest bardzo niskie. Moc wyjściowa przekraczająca 70% mocy znamionowej wystąpiła zaledwie przez 11% czasu realizacji pomiarów, który był korzystny dla pracy siłowni (maj - czerwiec). Z wykonanych symulacji (Tab. 4) wynika, że obniżenie mocy znamionowej falownika do 0,8 mocy DC generatora PV w P_{MPP} nieznacznie, bo tylko średnio o ok. 0,2% obniżyło uzysk energii (ΔE_{el}) w okresie objętym badaniem. W obiektach, w których następowało odłączenie falownika od sieci ze względu na przekroczenie dopuszczalnego poziomu napięcia nastąpił nawet wzrost ilości generowanej energii. Z badań wynika, że należy rozważyć obniżenie mocy falownika do 0,6 mocy DC PV w P_{MPP} , ponieważ obniżenie uzysku energii jest teoretycznie na

poziomie ok. 9% (w okresie letnim). Warto zaznaczyć, że dzięki obniżeniu mocy znamionowej falownika zwiększamy średnią jego sprawność, ponieważ ograniczamy czas pracy przy obciążeniu poniżej 30% mocy znamionowej charakteryzującej się niską sprawnością (Tab. 3). Obniżenie uzysku energii w pikach, zostanie zrekompensowane wzrostem sprawności pracy falownika a dodatkowo poprawi jakość energii elektrycznej ograniczając szybkie zmiany napięcia.

Autorzy: dr. inż. Krzysztof Necka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: krzysztof.necka@urk.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Natural Gas EU Dutch TTF, Natural Gas EU Dutch TTF. Dostęp: 10 marzec 2023. [Online]. Dostępne na: <https://pl.tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>
- [2] Amsterdam-Rotterdam-Antwerpia. Dostęp: 10 marzec 2023. [Online]. Dostępne na: https://www.wnp.pl/gornictwo/notowania/ceny_węgla/
- [3] Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) – Global Energy and Climate Model – Analysis, IEA. Dostęp: 24 luty 2023. [Online]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>
- [4] Announced Pledges Scenario (APS) – Global Energy and Climate Model – Analysis, IEA. Dostęp: 24 luty 2023. [Online]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/announced-pledges-scenario-aps>
- [5] Renewable power generation costs in 2021, 2021
- [6] Kontrakty terminowe na emisję CO2. <https://pl.investing.com/commodities/carbon-emissions-streaming-chart>
- [7] Raport z rynku CO2. KOBIZE, Luty 2023, Nr 131
- [8] Topolski Ł., Schab W., Firlit A., Piątek K., Analiza wpływu generacji rozproszonej na wybrane parametry jakości energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 3, 17-20
- [9] Kurytnik I., Drózd T., Kuciński S., Badania zaburzeń elektromagnetycznych na przyłączach energetycznych odnawialnych źródeł energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 5, 252-255
- [10] Łowczowski K., Nadolny Z., Voltage Fluctuations and Flicker in Prosumer PV Installation, *Energies*, (2022), No. 15, 2075
- [11] Norma PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, PKN, 2010
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r., w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania system elektroenergetycznego (Dz. U. nr 93, poz. 623)
- [13] Norma DIN VDE V 0126-1-1 VDE V 0126-1-1:2013-08 Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid
- [14] PN-EN 61000-4-30:2015-05 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-30: Metody badań i pomiarów -- Metody pomiaru jakości energii
- [15] PN-EN 61000-3-3:2013-10/A1:2019-10 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 3-3: Poziomy dopuszczalny -- Ograniczanie zmian napięcia, wahań napięcia i migotania światła w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia, powodowanych przez odbiorniki o fazowym prądzie znamionowym $I_n = 16\text{ A}$ przyłączone bezwarunkowo
- [16] https://www.fronius.com/Datasheets/SE_DE_Fronius_Symo_PL.pdf