

Analiza możliwości rozbudowy instalacji fotowoltaicznej o turbinę wiatrową

Streszczenie. W artykule omówiono możliwość rozbudowy przydomowej instalacji fotowoltaicznej o mały generator wiatrowy. Przedstawiono obliczenia mocy generowanej zależnie od rozmiarów wirnika turbiny. Obliczenia energii wyprodukowanej przez generator wykonano dla wybranej lokalizacji o stosunkowo słabych warunkach wietrznych. Wyznaczono przykładowe rozkłady dobowe mocy: generowanej przez generator wiatrowy, panele fotowoltaiczne oraz całkowitej oddawanej przez falownik do sieci energetycznej.

Abstract. The article discusses the possibility of expanding a home photovoltaic installation with a small wind turbine. Calculations of the dependence of the generated power on the size of the turbine rotor are presented. The calculations of the energy produced by the generator were made for a selected location with relatively weak wind conditions. Examples of daily distributions of the power generated by the wind turbine, photovoltaic panels and the total power transferred by the inverter to the power grid were determined. (**Analysis of the possibility of expanding a photovoltaic installation with a wind generator.**)

Słowa kluczowe: generator wiatrowy, przełączalny generator reluktancyjny, instalacja fotowoltaiczna.

Keywords: wind generator, switched reluctance generator, photovoltaic installation.

Wstęp

Generatory wiatrowe mają duży udział w produkcji energii elektrycznej na skalę przemysłową, jednak wśród małych elektrowni przydomowych mają one niewielki udział [1]. Natomiast w ostatnim czasie znacznie wzrosła liczba przydomowych instalacji fotowoltaicznych. Stopień wykorzystania stosowanych w nich inwerterów jest w większości przypadków niewielki. Wpływ na to mają takie czynniki, jak pora roku, pora dnia, czy pogoda. Dodatkowo produkcja energii zależy nie tylko od irradacji, ale również od temperatury powietrza. Pomimo dobrego nasłonecznienia w okresie letnim moc maksymalna elektrowni fotowoltaicznych nie jest osiągana ze względu na spadek wydajności ogniw spowodowany wysoką temperaturą powietrza. Inwertery pracują z pełną mocą sporadycznie, głównie późną wiosną i wczesną jesienią w godzinach południowych. Dodatkowo nie są wcale wykorzystywane po zachodzie słońca.

Jednocześnie większość inwerterów ma możliwość podłączenia kilku obwodów fotowoltaicznych, jednak ze względu na lepszą wydajność preferowane jest łączenie paneli fotowoltaicznych szeregowo w pojedynczy obwód, aby uzyskać wyższe napięcie. Powoduje to wcześniejsze rozpoczęcie pracy inwertera. Drugie wejście inwertera pozostaje często niewykorzystane. Daje to potencjalną możliwość podłączenia do już zainstalowanych instalacji dodatkowych źródeł energii, o innym rozkładzie czasowym produkcji energii, niż panele fotowoltaiczne.

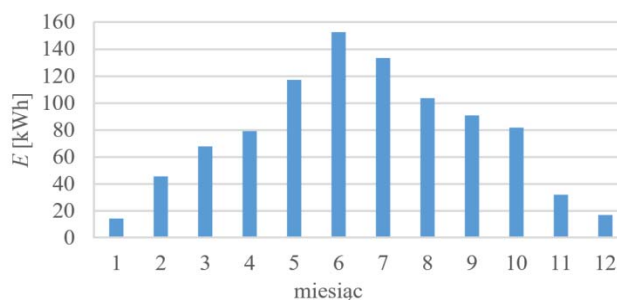
Maksymalna moc oddawana do sieci z przydomowej elektrowni ograniczona jest mocą znamionową inwertera, zazwyczaj z możliwością zwiększenia jej o około 10%, zależnie od typu i producenta inwertera. Nadwyżka energii przy przekroczeniu mocy maksymalnej falownika nie zostanie oddana do sieci energetycznej.

Jak wykazują badania dobrym uzupełnieniem elektrowni fotowoltaicznych mogą być generatory wiatrowe [2]. Wpływ na to mają ich rozkłady czasowe produkcji energii. Charakteryzują się one dużą produkcją energii w dni pochmurne, rano i wieczorem, działają również w nocy, a dodatkowo mogą być efektywnie stosowane w warunkach miejskich oraz silnie zurbanizowanych [3, 4, 5]. Wydajność fotowoltaiki w tym czasie jest niewielka lub instalacja fotowoltaiczna w ogóle nie pracuje. Dołączenie generatora wiatrowego o niewielkiej mocy do wolnego wejścia

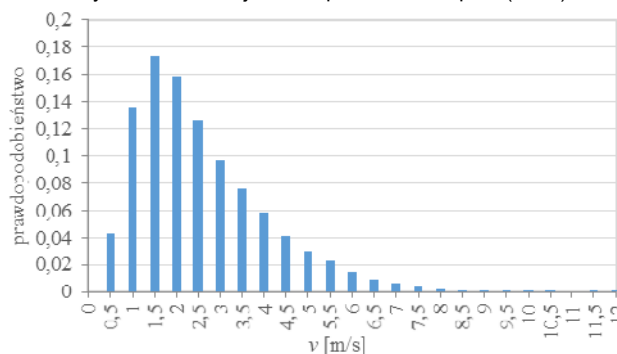
inwertera nie powinno więc mieć istotnego wpływu na działanie instalacji fotowoltaicznej, natomiast może zwiększyć roczną produkcję energii.

Pewną trudność stanowi tu konieczność zapewnienia możliwości obciążenia generatora w dowolnej chwili, nawet przy dobrym nasłonecznieniu, gdy inwerter pracuje z pełną mocą, w celu ograniczenia prędkości turbiny. Konieczne jest więc zapewnienie możliwości hamowania turbiny, np. z wykorzystaniem lokalnego obciążenia.

W artykule omówiono możliwość współpracy przełączalnego generatora reluktancyjnego (SRG) z małą elektrownią fotowoltaiczną [6, 7]. Uwzględniono przy tym rozkłady roczne wiatru i radiacji w lokalizacji o słabych warunkach wietrznych (Opole). Na rys. 1. przedstawiono roczny rozkład produkcji energii w przeliczeniu na 1 kW mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej.



Rys.1. Roczny rozkład produkcji energii elektrowni fotowoltaicznej z 1 kW mocy zainstalowanej – dane pomiarowe, Opole (2021)



Rys.2. Roczny rozkład prędkości wiatru – dane pomiarowe, Opole (2021)

Wykres pokazany na rys. 1. przedstawia dane pomiarowe z 2021 r. dla kierunku południowy-zachód. Rysunek 2 przedstawia roczny rozkład prędkości wiatru w tym rejonie na wysokości 10 m. Maksymalne prędkości wiatru ujęte w rozkładzie rocznym dla tej lokalizacji nie przekraczają 9 m/s. Typowe turbiny wiatrowe nie uzyskają więc mocy znamionowej. W związku z tym konieczne jest zaprojektowanie turbiny dostosowanej do mniejszych prędkości wiatru. Wzrost kosztu turbiny można ograniczyć wykorzystując istniejący falownik fotowoltaiczny.

Generator wiatrowy

W przypadku wykorzystania inwertera fotowoltaicznego jego napięcie wejściowe po stronie DC powinno znajdować się w zadanym zakresie, np. pomiędzy 150 V a 800 V, przy czym napięcie startowe jest wyższe od minimalnego i wynosi około 200 V (dane inwertera Huawei). W związku z tym napięcie wyjściowe generatora powinno mieścić się w tym zakresie. Parametry sterowania przelączalnego generatora reluktancyjnego (SRG) określono stosując program symulacyjny [8].

W przypadku przelączalnych generatorów reluktancyjnych do analizy ich pracy stosuje się uproszczony model matematyczny [9], który nie uwzględnia wzajemnych sprzężeń magnetycznych oraz strat w żelazie. Model taki można zapisać w postaci (1), (2).

$$(1) \quad J \frac{d\dot{\theta}}{dt} = T_m - T_e - D\dot{\theta}$$

$$(2) \quad \frac{d(\Psi_k(\theta, i_k))}{dt} = v_k - R_k i_k$$

gdzie: J – moment bezwładności generatora, T_m – moment na wale generatora, T_e – moment elektromagnetyczny, D – współczynnik oporów ruchu, Ψ_k – strumień magnetyczny skojarzony z k -tym pasmem, v_k – napięcie wyjściowe k -tego pasma generatora, R_k – rezystancja uzwojeń k -tego pasma generatora, i_k – prąd k -tego pasma generatora, θ – kąt obrotu wirnika.

Postać taka, choć ogranicza dokładność uzyskiwanych wyników, umożliwia znaczne skrócenie czasu obliczeń, co jest istotne przy wielokrotnie powtarzanych obliczeniach. Generatory SRG wzbudzone są prądem w uzwojeniach stojana, z których następnie energia oddawana jest do odbiornika. Napięcie wzbudzania pasma generatora opisuje zależność (3), przy czym jego źródłem może być magazyn zewnętrzny (podczas inicjalizacji lub pracy impulsowej) lub inne pasmo generatora (podczas pracy ciągłej). Natomiast zależność (4) opisuje napięcie w stanie generacji.

$$(3) \quad v_k = V_S - 2V_{TCE}$$

$$(4) \quad v_k = -V_S - 2V_{DAC}$$

gdzie: V_S – napięcie magazynu energii, V_{TCE} – napięcie nasycenia tranzystora, V_{DAC} – napięcie anoda-katoda diody w przewodzeniu.

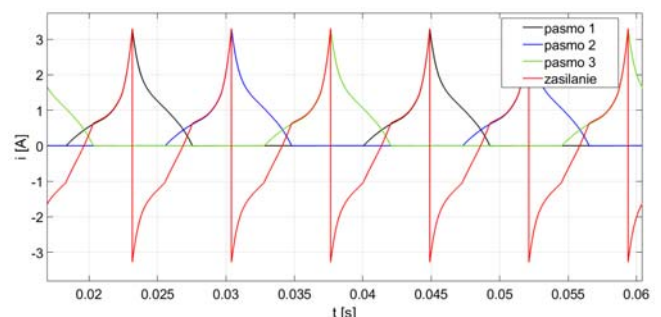
W przypadku proponowanej instalacji hybrydowej zewnętrzne źródło wzbudzenia powinno być odseparowane od wejścia inwertera, w celu zapobiegania przepływu energii z tego źródła bezpośrednio do inwertera. Z tego względu jego napięcie powinno być niższe od minimalnego napięcia wejściowego inwertera.

Badania Elektrowni hybrydowej przeprowadzono dla trójpasmowego generatora SRG o mocy 400 W, posiadającego 6 biegunów w stojanie i 4 zęby w wirniku. Model symulacyjny wykonano w oparciu o charakterystyki momentu i strumienia magnetycznego wyznaczone metodą obliczeń polowych i zweryfikowane pomiarowo.

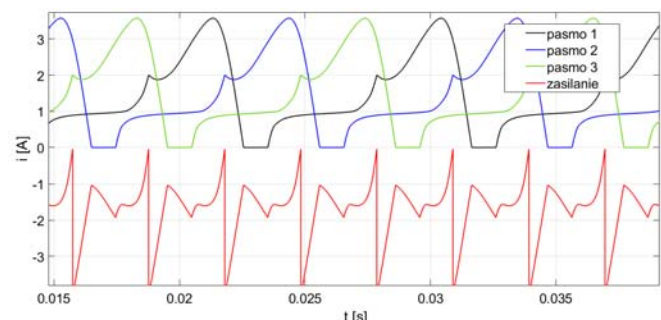
Na podstawie wykonanych symulacji określono parametry pracy generatora spełniające warunki, przy których następuje inicjalizacja generacji oraz warunki przejścia do pracy ciągłej, podczas której pasma wzbudzone są energią generowaną przez inne uzwojenia generatora. W tym stanie energia nie jest pobierana z magazynu zewnętrznego. Przebiegi prądów fazowych oraz prądu wyjściowego generatora w trybie pracy impulsowej oraz po przejściu w stan pracy ciągłej pokazano odpowiednio na rys. 3 i 4.

Wartość napięcia wyjściowego generatora przy pracy ciągłej ustalono na 220 V, co gwarantuje start inwertera. W przypadku spadku napięcia na wejściu inwertera poniżej 150 V następuje automatyczne wyłączenie inwertera i konieczna jest ponowna inicjalizacja. Zewnętrzny układ wzbudzenia składa się z zasilacza 140 V z układem ograniczenia prądowego i kondensatorem filtrującym. Kondensator jest automatycznie doładowywany do wartości 140 V. Wartość taka zapobiega pobieraniu przez inwerter energii z prostownika, ponieważ przy spadku napięcia po stronie DC poniżej 150 V falownik zostaje wyłączony.

Stosując program symulacyjny wyznaczono zależności parametrów sterowania przy jakich generator pracuje z największą mocą w zakresie poniżej prędkości znamionowej oraz prędkość i parametry przy jakich generator przechodzi do pracy ciągłej. Prędkość ta wynosi 1650 obr./min. (27,5 obr./s), przy ustalonym napięciu wyjściowym generatora równym 220 V. Poniżej tej prędkości generator może również generować energię, ale w sposób przerywany, pobierając energię do magnesowania z prostownika lub kondensatora wejściowego falownika. Dalej generator pracuje przy stałej prędkości, co wynika z przyjętej charakterystyki wirnika turbiny.



Rys. 3. Przebiegi prądów podczas pracy przerywanej przy prędkości 690 obr./min



Rys. 4. Przebiegi prądów podczas pracy ciągłej przy prędkości 1650 obr./min

Wyznaczenie parametrów turbiny

Do przeprowadzania obliczeń wydajności elektrowni wiatrowej przyjęto wirnik trójłopatowy. Dla tego typu wirnika współczynnik szybkobieżności turbiny $\lambda=7$. Obliczenia wykonano dla kilku wartości prędkości wiatru, przy jakich

generator powinien przejść do pracy ciągłej z prędkością obrotową równą 1650 obr./min., tj. 6, 8, 10 m/s.

W obliczeniach pominięto wirniki dostosowane do wiatrów o niższych prędkościach ze względu na ich zbyt duże rozmiary oraz do wiatrów o wyższych prędkościach, ze względu na roczny rozkład prędkości wiatrów w badanej lokalizacji. Na podstawie (5) wyznaczone zostały prędkości obrotowe turbin dla przyjętych wartości prędkości wiatru. Wynoszą one odpowiednio 6,69 obr./s, 8,92 obr./s, 11,15 obr./s.

$$(5) \quad n = \frac{\lambda v}{2\pi}$$

gdzie: v – prędkość wiatru w m/s, λ – współczynnik szybkobieżności, n – prędkość obrotowa turbiny wyrażona w obr./s.

Dla uzyskanych prędkości obrotowych turbin obliczono przełożenie przekładni mechanicznych podwyższających prędkość do prędkości przejścia z pracy impulsowej do pracy ciągłej generatora. Obliczone przełożenia przekładni wynoszą odpowiednio: 4,11 dla wiatru o prędkości 6 m/s, 3,08 dla wiatru o prędkości 8 m/s i 2,47 dla wiatru o prędkości 10 m/s.

Wartość momentu elektromagnetycznego generatora w przyjętym punkcie pracy ciągłej wynosi 2,8 Nm. Dla tak dobranych wirników turbin wiatrowych obliczono ich moc wyjściową. Dla turbin przyjęto typową prędkość startową małych turbin wiatrowych wynoszącą 2,5 m/s.

Do obliczeń parametrów turbin przyjęto wartość współczynnika mocy $C_p(\lambda)=0,36$ oraz gęstość powietrza $\rho=1,225$ kg/m³. Moc wirnika doprowadzaną do przekładni mechanicznej można obliczyć na podstawie (6) [8].

$$(6) \quad P = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) v^3$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza $\rho=1,225$ kg/m³, S – powierzchnia zakreślana przez wirnik, $C_p(\lambda)$ – współczynnik mocy turbiny.

Przyjmując szacunkowo straty mechaniczne w generatorze i w przekładni na poziomie 2% na podstawie (7) określono moc potrzebną do napędzenia generatora w stanie pracy ciągłej. Oczekiwana moc turbiny wynosi 484 W.

$$(7) \quad P_1 = \frac{P_2}{\eta_T \eta_G}$$

gdzie: P_1 – moc doprowadzona do wału generatora, P_2 – moc wyjściowa generatora, η_T – sprawność wirnika turbiny z przekładnią, η_G – sprawność mechaniczna generatora.

W dalszej kolejności na podstawie (8) obliczono promienie wirników dla przyjętych prędkości wiatru.

$$(8) \quad r = \sqrt{\frac{2P}{\pi \rho C_p(\lambda) v^3}}$$

Wynoszą one odpowiednio 1,8 m dla wiatru o prędkości 6 m/s, 1,17 m dla wiatru o prędkości 8 m/s oraz 0,84 m dla wiatru o prędkości 10 m/s.

Wyznaczone wartości prędkości obrotowych generatora i mocy mechanicznych wirników uzyskiwane dla różnych wielkości turbin wiatrowych zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Zależność prędkości obrotowej i mocy mechanicznej wirnika od prędkości wiatru dla turbin zaprojektowanych do pracy przy prędkości wiatru: $n_6 - 6$ obr./s, $n_8 - 8$ obr./s, $n_{10} - 10$ obr./s

v [m/s]	n_6 [obr./s]	P_6 [W]	n_8 [obr./s]	P_8 [W]	n_{10} [obr./s]	P_{10} [W]
2,5	11,5	35,1	8,6	14,8	6,9	7,6
3	13,8	60,6	10,3	25,6	8,3	13,2
4	18,3	143,6	13,7	60,7	11,0	31,3
5	22,9	280,4	17,1	118,5	13,8	61,1
6	27,5	484,6	20,6	204,7	16,5	105,5
7	27,5	484,6	24,0	325,1	19,3	167,6
8	27,5	484,6	27,5	485,3	22,0	250,1
9	27,5	484,6	27,5	485,3	24,8	356,1
10	27,5	484,6	27,5	485,3	27,5	488,5

Największą moc w zakresie małych prędkości uzyskuje się z turbin o największych rozmiarach, ale jej stosowanie wiąże się ze znacznym wzrostem kosztów inwestycji. Może to wymagać również wykonania konstrukcji masztu o większej wytrzymałości, ponieważ w każdej lokalizacji zdarzają się krótkotrwałe wiatry o dużych prędkościach.

Zależność mocy generowanej przez elektrownię wiatrową od prędkości wiatru przy napięciu wyjściowym 220 V zestawiono w Tabeli 2. Przyjęto, że poniżej prędkości startowej elektrownia nie pracuje.

Tabela 2. Zestawienie mocy generowanej dla turbin zaprojektowanych do prędkości wiatru: $n_6 - 6$ obr./s, $n_8 - 8$ obr./s, $n_{10} - 10$ obr./s

N [m/s]	P_6 [W]	P_8 [W]	P_{10} [W]
2,5	33,7	14,2	7,3
3	58,2	24,6	12,7
4	139,1	58,3	30,6
5	269,3	113,8	58,7
6	400,7	196,6	101,3
7	400,7	312,2	156,5
8	400,7	400,7	259,7
9	400,7	400,7	342,0
10	400,7	400,7	400,7

Z rozkładu prędkości wiatru i danych z Tabeli 2 wynika, że nawet w przypadku zastosowania największej turbiny będzie ona pracowała z mocą znamionową jedynie przez kilkaset godzin w roku.

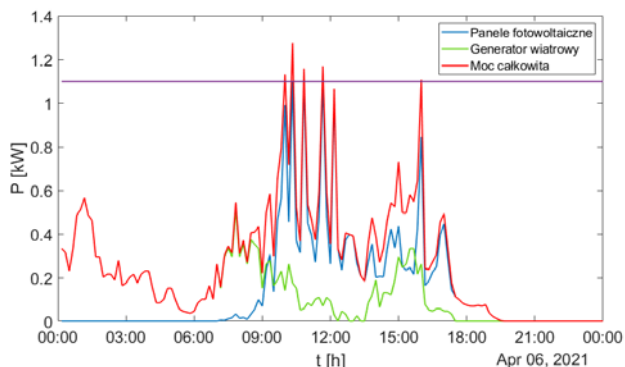
Współpraca generatora wiatrowego z instalacją fotowoltaiczną

Dla elektrowni wiatrowych o wyznaczonych parametrach przeprowadzono obliczenia prognozowanej rocznej produkcji energii. Podobnie jak w przypadku instalacji fotowoltaicznej wyniki przeskalowano do 1 kW mocy zainstalowanej generatora i zestawiono w Tabeli 3.

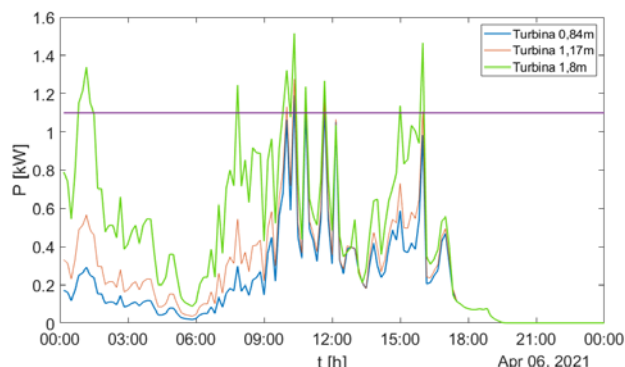
Tabela 3. Prognozowana roczna produkcja energii przypadająca na 1 kW mocy zainstalowanej elektrowni

Promień turbiny [m]	Roczna produkcja energii [kWh]
1,8	882
1,16	416
0,86	220

Na podstawie przebiegów zmian mocy elektrowni wiatrowej (uśrednianych za okres 10 min.) oraz elektrowni słonecznej (uśrednianych za okres 5 min.) porównano oba rozkłady dla wybranych dni w roku oraz obliczono moc całkowitą przypadającą na 1 kW mocy zainstalowanej obu elektrowni. Przyjęto moc maksymalną inwertera wyższą o 10% od jego mocy znamionowej, tj. 1,1 kW. Następnie określono energię całkowitą uzyskiwaną z elektrowni hybrydowej fotowoltaiczno-wiatrowej oraz moc oddaną do sieci energetycznej przez falownik. Na rys. 5. przedstawiono przebiegi mocy dla wybranego dnia.



Rys. 5. Przebiegi mocy elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej z turbiną o promieniu 1,17 m oraz mocy całkowitej elektrowni hybrydowej, z zaznaczoną mocą maksymalną falownika



Rys. 6. Przebiegi mocy całkowitej elektrowni hybrydowej przy zastosowaniu turbin o promieniach: 0,84 m; 1,17 m; 1,8 m z zaznaczoną mocą maksymalną falownika

Na rysunku 6 porównano przebiegi mocy generowanej w rozpatrywanym dniu przez elektrownie z turbinami zaprojektowanymi do prędkości wiatru 6 m/s, 8 m/s i 10 m/s. Przebiegi widoczne na rys. 6 świadczą o tym, że w wybranej lokalizacji nawet w stosunkowo wietrzne dni i zastosowaniu turbiny o promieniu 1,8 m, tylko niewielka część energii nie zostaje oddana do sieci. W tabeli IV przedstawiono zestawienie wydajności elektrowni fotowoltaicznej z elektrownią hybrydową oraz wartości energii, która została odprowadzona do sieci zasilającej ze względu na ograniczenie mocy inwertera.

Tabela 4. Porównanie dziennej produkcji energii dla różnych warunków pogodowych dla mocy zainstalowanej 1 kW dla elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej wraz z wartością energii oddawanej do sieci po uwzględnieniu mocy maksymalnej inwertera

Energia	kWh
panele fotowoltaiczne	3,52
turbina wiatrowa (1,17 m)	3,20
całkowita instalacji hybrydowej (1,17m)	6,72
oddana z inwertera do sieci energetycznej (1,17m)	6,67
turbina wiatrowa (1,8 m)	7,57
całkowita instalacji hybrydowej (1,8m)	11,09
oddana z inwertera do sieci energetycznej (1,8m)	10,77

Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują na zasadność projektowania turbin wiatrowych na podstawie rocznego rozkładu prędkości wiatru w planowanej lokalizacji. Uzyskane wyniki wskazują na to, że turbina zaprojektowana do prędkości wiatru 6 m/s może być stosowana w lokalizacjach o słabych warunkach wietrznych. Pozwala ona istotnie zwiększyć produkcję energii w stosunku do typowych turbin komercyjnych, projektowanych do prędkości wiatru 10-12 m/s.

Rozpatrując wartości rocznej produkcji energii z zastosowaniem turbin o promieniach 1,17 m oraz 0,84 m można stwierdzić, że turbina zaprojektowana do prędkości wiatru 8 m/s może być w tej lokalizacji stosowana, choć produkcja energii jest w tym przypadku znacznie mniejsza. Użycie komercyjnych turbin projektowanych do prędkości wiatru 10-12 m/s w takiej lokalizacji jest nieefektywne.

Zastosowanie elektrowni wiatrowej jako dodatkowego źródła energii w instalacjach fotowoltaicznych jest uzasadnione. Energia całkowita wyprodukowana przez elektrownię hybrydową jest prawie w całości oddawana do sieci energetycznej. Widoczny jest duży wzrost produkcji energii przy stosunkowo niewielkich nakładach inwestycyjnych. Podłączenie generatora wiatrowego do instalacji fotowoltaicznej może jednak wymagać stosowania dodatkowego obciążenia, umożliwiającego obciążanie turbiny przy przekroczeniu mocy falownika lub wydajnych hamulców mechanicznych.

Wzrost kosztów śmigła o większych rozmiarach może być skompensowany brakiem kosztów zakupu falownika.

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, dr inż. Krzysztof Wróbel, Politechnika Opolska, Katedra Automatyk Napędu i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: k.tomczewski@po.edu.pl, k.wrobel@po.edu.pl; dr hab. inż. Andrzej Tomczewski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: andrzej.tomczewski@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Tummala A. et al., A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2016), vol. 56, pp. 1351-1371
- [2] Abdelkrim B., et al., Power quality improvement and low voltage ride through capability in hybrid wind-PV farms grid-connected using dynamic voltage restorer, *IEEE Access*, (2012), vol. 6, pp. 68634-68648
- [3] Battisti L. et al., Small wind turbine effectiveness in the urban environment, *Renewable Energy*, (2018), vol. 129, pp. 102-113
- [4] Anup KC, Whale J., Urmee T., Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review, *Renewable Energy*, (2019), vol. 131, pp. 268-283
- [5] De Kooning J. D.M. et al., Techno-economic optimisation of small wind turbines using co-design on a parametrised model, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, (2021), vol. 45, 101165
- [6] Ogawa K., Yamamura N., Ishida M., Study for Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai, (2006), pp. 1510-1515
- [7] Meiqin M., Jianhui S., Chang L., Guorong Z., Yuzhu Z., Controller for 1kW-5kW wind-solar hybrid generation systems, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, (2008) pp. 001175-001178
- [8] Korkosz M., Powrozek A., The influence of control parameters on energy efficiency of switched reluctance generator for vehicle applications, *E3S Web of Conferences*, 14, (2017), 01037
- [9] Cardenas R., Pena R., Perez M., Asher G., Clare J., Wheeler P., Control system for grid generation of a switched reluctance generator driven by a variable speed wind turbine, *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IECON*, (2004), vol. 2, pp. 1879-1884