

doi:10.15199/48.2016.09.15

Analiza parametrów modułów fotowoltaicznych stacjonarnych i nadążnych w warunkach rzeczywistych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki dziewięcioletnich badań z różnych okresów pracy instalacji fotowoltaicznej. Analizie porównawczej poddano układ nadążny i stacjonarny zainstalowany na budynku Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. System wyposażony jest w połączone szeregowo moduły, które przekazują energię elektryczną do sieci wewnętrznej uczelni. Parametry instalacji są na bieżąco rejestrowane i archiwizowane.

Abstract. The following paper presents the results of 9 years-time electrical parameters measurements of photovoltaic system working at different periods. They were installed on the building of the Faculty of Electrical, Electronic, Computer and Control Engineering at the Technical University of Łódź. The system is equipped with PV modules connected in series, which transfer electrical energy to the internal university network through converters. system parameters are stored and monitored. (**Analysis of PV modules under real atmospheric conditions**).

Słowa kluczowe: konwersja energii słonecznej, fotowoltaika, krzemowe ogniwa słoneczne, stacjonarny system fotowoltaiczny, nadążny system fotowoltaiczny.

Keywords: conversion of solar energy, photovoltaic, silicon solar cells, stationary photovoltaic system, installation of sun tracking collectors.

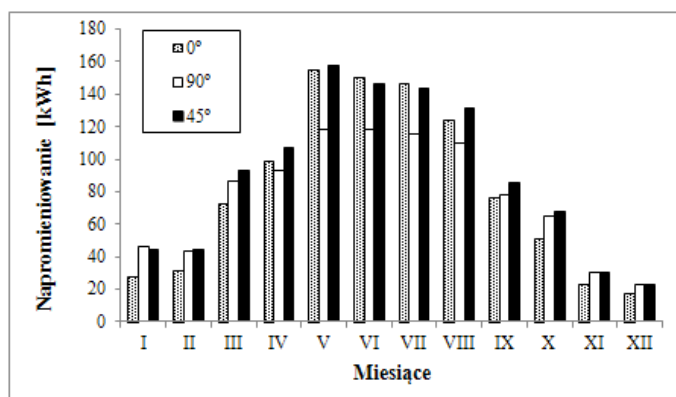
Wprowadzenie

Kiedy moduły fotowoltaiczne zaczęto używać komercyjnie, około 20 lat temu, ich sprawność wynosiła zaledwie 10% [1]. Obecnie sprawność ogniwa wielozłączowych wzrosła do 46% (four-junction solar cells) [2]. Aby praktycznie wykorzystać energię słoneczną docierającą do powierzchni absorbera, należy uwzględnić nachylenie modułu, tak aby uzyskać optymalny kąt padania promieni słonecznych [3]. Zainstalowanie modułów fotowoltaicznych na platformie z układem nadążnym może istotnie zwiększyć ilość uzyskanej energii elektrycznej [4], jednakże wpływa na zwiększenie kosztów instalacji. Celem badań było porównanie dwóch rozwiązań konstrukcyjnych mocowań modułów fotowoltaicznych: stacjonarnego oraz nadążnego w warunkach rzeczywistych AM 1,5. W celu uzyskania miarodajnych wyników analizą objęto łącznie

okres 9 lat eksploatacji. Porównanie energii uzyskanej z poszczególnych systemów pozwoli w przyszłości na wybranie najbardziej optymalnej konfiguracji dla warunków centralnej Polski.

Warunki solarne Łodzi

Wartości napromieniowania wybranych miast dla różnych okresów, orientacji i pochylenia do poziomu można uzyskać z bazy danych klimatycznych Ministra Infrastruktury i Rozwoju [5]. Roczna wartość promieniowania słonecznego w Polsce przyjmuje się na poziomie 1000 kWh/m² [6]. Rysunek 1 prezentuje napromieniowanie miesięczne dla Łodzi na 1 m² powierzchni horyzontalnej oraz dla odbiornika usytuowanego pod kątem 45° i 90° w kierunku południowym.



Rys. 1. Napromieniowanie miesięczne Łodzi dla usytuowania odbiornika pod kątem 0° oraz 45°S i 90°S, opracowanie własne na podstawie Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.

Obliczono, że roczna wartość napromieniowania dla Łodzi, na powierzchnię horyzontalną wynosi 978 kWh/m². Dla usytuowania odbiornika pod kątem 45° jest ona o 10% większa (1074 kWh/m²), a przy 90° o 6% mniejsza (929 kWh/m²).

Przedmiot badań

W 2007 roku na budynku Politechniki Łódzkiej został uruchomiony automatyczny, komputerowy system zbierania podstawowych parametrów pracy systemu fotowoltaicznego

oraz danych meteorologicznych. W skład systemu wchodzi system fotowoltaiczny stacjonarny (rys. 2) oraz system fotowoltaiczny nadążny (rys. 3). Moduły znajdują się na dachu i na elewacji budynku Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej ($\Phi = 51^{\circ}46'36''N$; $\varphi = 19^{\circ}27'17''E$). Panele w systemie nadążnym umieszczone zostały na konstrukcji nadążnej produkcji firmy DEGER energie GmbH, typu DEGER Tracker 3000NT Konstrukcja ta umożliwia regulację w zakresie wschód/zachód oraz kąta pochylenia. Regulacja

odbywa się poprzez siłowniki sterowane przez cyfrowy sterownik podłączony do niezależnych czujników promieniowania słonecznego[6]. System nadążny do zmiany orientacji używa energii wygenerowanej przez siebie. Śledzenie ruchu słońca odbywa się w sposób ciągły.

Moduły stacjonarne i nadążne podzielone zostały na trzy równe, połączone szeregowo zespoły jednofazowe podłączone do sieci. Przyłączenie jest zrealizowane przez falowniki typu Sunny Boy. Moduły fotowoltaiczne nadzoruje

urządzenie Sunny Boy Control Plus, który umożliwia zbieranie oraz obrazowanie danych na komputerach klasy PC. Rysunek 4 przedstawia szczegółowy schemat badanego systemu fotowoltaicznego.

Poniżej w tabeli 1 zostały przedstawione parametry systemów fotowoltaicznych a oraz parametry elektryczne pojedynczego modułu.



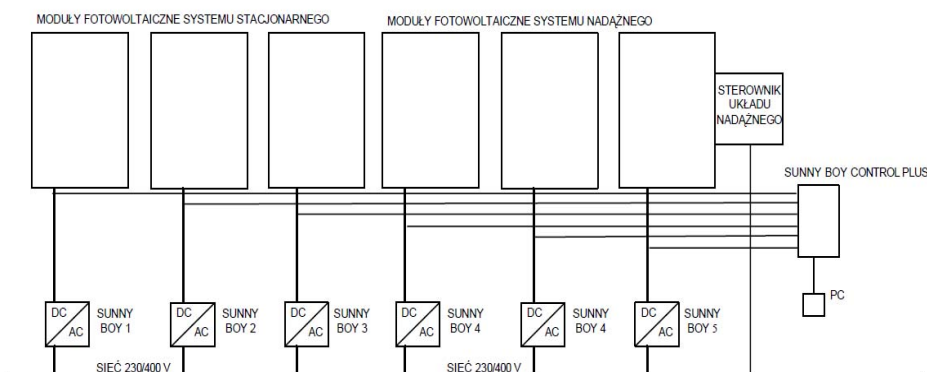
Rys. 2. Widok paneli fotowoltaicznych systemu fotowoltaicznego stacjonarnego



Rys. 3. Widok paneli fotowoltaicznych systemu fotowoltaicznego nadążnego

Tabela 1. Szczegółowe parametry systemu fotowoltaicznego nadążnego i stacjonarnego oraz parametry elektryczne modułów [8, 9]

Parametr	Parametry systemu		Parametry elektryczne		
	Stacjonarny	Nadążny	Parametr	Stacjonarny	Nadążny
Ilość modułów (sztuk)	27	45	P_{mp} (W)	225	200
Moc systemu (kWp)	6	9	I_{mp} (A)	7,44	7,27
Typ paneli	225TT	SF200A	I_{sc} (A)	8,13	7,77
Łączna powierzchnia (m ²)	45	75	V_{mp} (V)	30,30	27,60
Producent:	IBC PolySol	Solar-Fabrik AG	V_{oc} (V)	36,70	35,00
Ogniwa	Polikrystaliczne	Polikrystaliczne			

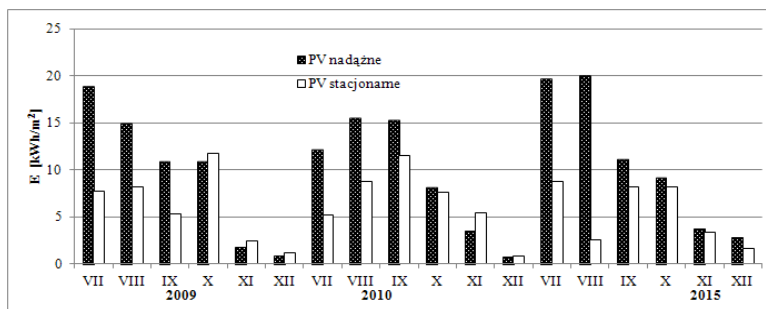


Rys. 4. Schemat badanej instalacji fotowoltaicznej

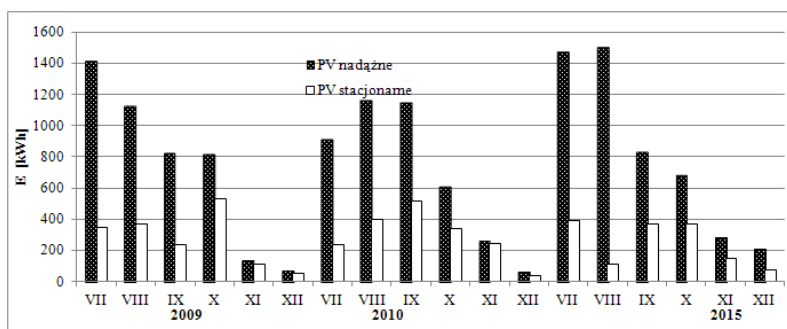
Długoterminowa analiza pomiarów energetycznych

Poniżej przedstawiono wyniki od 1 lipca do 31 grudnia z lat 2010, 2011 i 2015. Dają one możliwość dokładnej analizy zebranych danych. Na rysunku 5 przedstawiony jest wykres miesięcznego uzysku energetycznego z 1 m²

modułu z systemu nadążnego i stacjonarnego. Rysunek 6 prezentuje całkowitą energię elektryczną wytworzoną przez obie instalacje w badanym okresie z podziałem na miesiące.



Rys. 5. Miesięczny uzysk energii z 1 m² modułu dla paneli nadążnych i stacjonarnych w 2010, 2011 i 2015 r.



Rys. 6. Sumaryczny miesięczny uzysk z paneli nadążnych i stacjonarnych w 2010, 2011 i 2015 r.

Zestawienie uzysku energii w modułach stacjonarnych i nadążnych dla analizowanych lat przedstawia tabela 2. W analizowanym okresie system paneli fotowoltaicznych nadążnych i stacjonarnych dostarczył do sieci wewnętrznej Politechniki Łódzkiej około 17 MWh energii. Należy jednak zaznaczyć, że przedstawiono tylko okres 6 miesięcy w ciągu roku.

Tabela 2. Uzysku energii w modułach stacjonarnych i nadążnych przez sześć miesięcy 2010, 2011 i 2015 roku

System	Energia uzyskana z modułów [kWh]		
	2010	2011	2015
Stacjonarny	1645	1770	1466
Nadążny	4382	4155	4990
Suma	6027	5925	6456

Ilość energii uzyskanej w modułach nadążnych z analizowanego okresu jest średnio 2,8 razy większa niż w modułach stacjonarnych. Natomiast, jeżeli bierze się pod uwagę miesięczny uzysk energii z 1 m² modułu dla paneli nadążnych i stacjonarnych (rys. 5) w miesiącach: październiku, listopadzie i grudniu 2010 oraz listopadzie i grudniu 2011 z 1 m² systemu stacjonarnego uzyskano więcej energii. W tych miesiącach występowało większe usłonecznienie i mniejsza średnia temperatura w porównaniu do innych lat poddanych analizie.

Jednodniowa analiza systemów fotowoltaicznych

Badania wykonano 23 września 2015 r. w godzinach od 8.00 do 18.00. Dzień wybrany był celowo. Był to dzień równonocy jesienniej, w związku z tym otrzymane wyniki zbliżone były do średniorocznych wartości. Pomiarów dokonywano w odstępach godzinnych. Wyniki obliczeń dla modułów stacjonarnych i nadążnych podano w tabeli 3.

Zestawienie ilości energii uzyskanych w modułach stacjonarnych i nadążnych w dniu 23 września 2015 r.

podano w tabeli 4.

Tabela 3. Moc uzyskana z 1 m² w modułach stacjonarnych i nadążnych

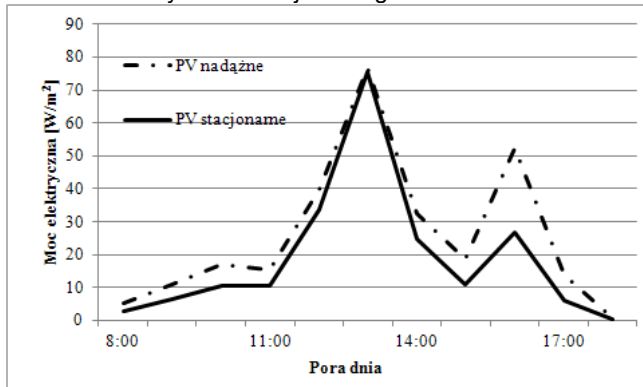
Pora dnia [godz.]	Moc uzyskana z modułów [W/m ²]	
	stacjonarnych	nadążnych
8:00	2,67	5,33
9:00	6,44	11,07
10:00	10,67	17,07
11:00	10,67	15,47
12:00	33,78	39,60
13:00	75,56	76,67
14:00	24,89	32,53
15:00	11,11	18,53
16:00	26,89	52,27
17:00	6,00	13,60
18:00	0,44	0,93

Tabela 4. Uzysku energii w modułach stacjonarnych i nadążnych w dniu 23 września 2015 r.

Moduły	Stacjonarne E _{sta}	Nadążne E _{nad}	E _{nad} - E _{sta}
Energia uzyskana z modułów [Wh/m ²]	207,56	279,93	72,38

Na rysunku 7 przedstawiono wykres mocy modułów w funkcji pory dnia. Z wykresu widać, że wykres mocy modułu nadążnego obejmuje większe pole powierzchni pod krzywą. W ciągu pierwszych godzin po wschodzie i przed zachodem promieniowanie słoneczne pada prostopadle do płaszczyzny modułu i dzięki temu jest lepiej wykorzystywane. W danym dniu w godzinach przedpołudniowych i wieczornych występowało duże zachmurzenie. Do godziny 11 i po 17 natężenie promieniowania nie przekroczyło 200 W/m². Korzyść energetyczna jest równa 34% w odniesieniu do modułów stacjonarnych. Sprawność przetwarzania energii w trakcie

badania wynosiła dla systemu nadążnego od 5% do 14%, natomiast dla systemu stacjonarnego od 2% do 12%.



Rys. 7. Wykres liniowy mocy w panelu stacjonarnym i nadążnym w funkcji pory dnia

Podsumowanie

Przedstawiona analiza jest wynikiem dziewięcioletniego monitoringu instalacji fotowoltaicznej złożonej z systemu stacjonarnego oraz nadążnego o łącznej mocy szczytowej 15 kWp. Rezultaty badań wskazują na duży potencjał energetyki słonecznej jako alternatywnego źródła energii centralnej Polski. Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że energia wytworzona przez moduły nadążne jest około 3 razy większa niż wytworzona w modułach stacjonarnych. Przedstawione w pracy wyniki badań modułów fotowoltaicznych stanowią podstawę do analizy

opłacalności ekonomicznej zastosowania modułów nadążnych, która będzie wykonana na etapie dalszych badań.

Autorzy: mgr inż. Paulina Sawicka-Chudy, dr hab. Marian Cholewa, prof. UR, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Aleja Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów, dr hab. inż. Maciej Sibiński, dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: maciej.sibinski@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004) 230-239
- [2] http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg, dostęp z dnia 14.03.2016
- [3] Klugman E. Klugman Radziemska E., Systemy słonecznego ogrzewania i zasilania elektrycznego budynków. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, (2002)
- [4] Mousazadeh H., Keyhani A i in., A review of principle and sun tracking methods for maximizing solar system output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, (2003)
- [5] www.mir.gov.pl, dostęp z dnia 20.08.2015 r.
- [6] <http://www.degereenergie.de/en/>, dostęp z dnia 14.03.2016
- [7] Waclawek M., Ogniwa słoneczne wpływ środowiska na ich pracę, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2011
- [8] <http://www.schwab-solartechnik.de>, dostęp z dnia 11.12.2015 r.
- [9] <http://www.posharp.com/>, dostęp z dnia 11.12.2015 R.