

Analiza wydajności energetycznej modułu fotowoltaicznego w skoncentrowanym promieniowaniu słonecznym

Analysis of a photovoltaic module energy efficiency in concentrated solar radiation

ESTERA BOŻEK, ARKADIUSZ SWAT, KRZYSZTOF SORNEK, MARIUSZ FILIPOWICZ

W artykule przedstawiono wyniki badań opisujące pracę wybranego polikrystalicznego krzemowego modułu fotowoltaicznego oświetlanego skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym (SPS). Celem zastosowania SPS jest zwiększenie wydajności modułów PV w stosunku do modułów o takiej samej aperturze pracujących w standardowym promieniowaniu słonecznym. Jako układu koncentrującego promieniowanie użyto specjalnie skonstruowanego koncentratora z lustrem parabolicznym i folią refleksyjną. Rozpatrzono trzy warianty pracy instalacji PV, tj. gdy moduł był zamontowany stacjonarnie w stojaku, gdy był umieszczony na trakerze oraz gdy znajdował się w pobliżu ogniska koncentratora. Przeanalizowano również wpływ temperatury ogniwa PV na parametry jego pracy.

Słowa kluczowe: ogniwo fotowoltaiczne, skoncentrowane promieniowanie słoneczne, energetyka słoneczna, instalacje słoneczne

In the paper results of investigation of a selected polycrystalline silicon solar cell in concentrated solar radiation (CSR) are described. The aim of CSR usage is increase of PV modules energy efficiency comparing PV modules with the same aperture working in non-concentrated solar radiation. A specially developed device with a parabolic mirror and reflective foil was used as a solar radiation concentrator. The three variants, i.e. standalone PV cell, PV cell with tracker (non-concentrated radiation) and in concentrated radiation are examined. Moreover, the influence of a solar cell temperature on its efficiency is analyzed.

Keywords: solar cell, solar radiation, concentrated solar radiation, solar energy, PV installations

Mgr inż. Estera Bożek, inż. Arkadiusz Swat, mgr inż. Krzysztof Sornek, dr hab. inż. Mariusz Filipowicz, prof. nadzw. – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

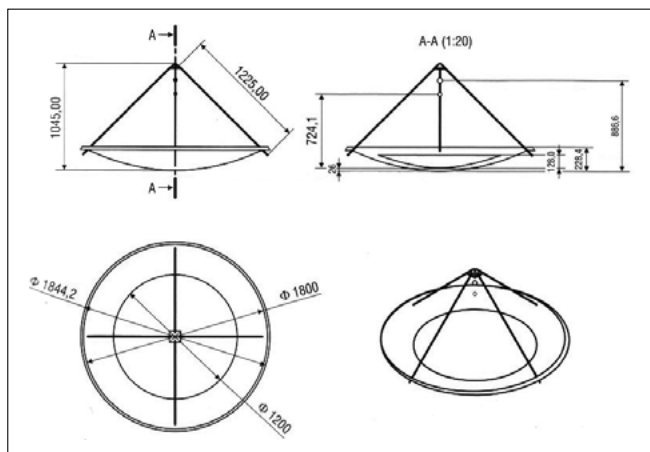
Wstęp

Instalacje służące do pozyskania energii z odnawialnych źródeł energii zyskują coraz większe zainteresowanie. Jest to podyktowane nie tylko przepisami Unii Europejskiej, lecz również osobistym dążeniem użytkowników do niezależności energetycznej i zmniejszania kosztów utrzymania budynków. Najbardziej pożądaną formą użytecznej energii jest energia elektryczna. Spośród znanych metod generacji prądu wykorzystujących odnawialne źródła energii dla małych instalacji, ogniwa fotowoltaiczne wytwarzają go w sposób najtańszy i najprostszy. Jednak największy problem stanowi niezbyt wysoka wydajność takich modułów, którą ustawicznie próbuje się zwiększyć.

W najpopularniejszych rodzajach ogniw krzemowych średnia sprawność wynosi ok. 8-15% dla warunków STC (Standard Test Conditions – prostopadłe promieniowanie słoneczne o mocy 1000W na 1m², temperatura 25°C, Spektrum Air Mass 1,5) [1,2] oraz więcej, w zależności od zastosowanej technologii ich wytwarzania. Stosowanych jest szereg rozwiązań technicznych mogących poprawić sprawność ogniw fotowoltaicznych [3], są to m.in.:

- zastosowanie ogniw wykorzystujących inne niż krzem materiały półprzewodnikowe o różnej wartości przerwy energetycznej, takie jak: cienkowarstwowe CIS (bazujące na selenku indowo-miedziowym CuInSe₂), CdS,
- ogniwa organiczne, tzw. polimery przewodzące; w perspektywie oczekuje się możliwości wytwarzania bardzo tanich ogniw fotowoltaicznych,
- wykorzystanie koncentratorów; stosowane są dwa typy koncentratorów – punktowe i liniowe; w technologii tej na niewielkie ogniwo PV kierowane jest skoncentrowane promieniowanie słoneczne,
- stosowanie układów śledzących położenie Słońca, typ układu śledzącego (traker) musi być dostosowany do rodzaju koncentratora; dla koncentratorów punktowych wymagane jest śledzenie w dwóch osiach obrotu, dla liniowego w jednej [4]. Do nieco bardziej zaawansowanych rozwiązań technicznych można zaliczyć:
- zastosowanie układów wielowarstwowych, składających się z kilku ogniw o różnej szerokości przerwy energetycznej czyli tzw. ogniw wielowarstwowych; promieniowanie, które nie zostało zaabsorbowane w pierwszej warstwie ze względu na niedopasowanie energii fali promieniowania do szerokości przerwy energetycznej zostaje wykorzystane w kolejnych warstwach [5].
- konwersja termofotowoltaiczna TPV, w której przy użyciu specjalnych powłok promieniowanie słoneczne przekształca-

Rys.1.
Schemat koncentratora promieniowania [11]



Rys.2.
Widok koncentratora promieniowania wraz z umieszczonym ogniwem PV

ne jest na falę o długości odpowiedniej dla konkretnego ogniwa fotowoltaicznego [6].

Wykorzystanie tych technologii pozwala już na uzyskanie sprawności ponad 40%, w przypadku użycia skoncentrowanego promieniowania słonecznego, chociaż badania takich układów są dopiero w fazie początkowej. Stosowanie układów wielowarstwowych umożliwia wykorzystanie większego zakresu długości fal z widma światła słonecznego [5]. Natomiast w układach TPV możliwe jest dobranie długości przekonwertowanego promieniowania pod kątem uzyskania optymalnej wydajności w ogniwie.

W dalszej części pracy omówiona jest jedna z metod wykorzystania skoncentrowanego promieniowania słonecznego. Należy tu zaznaczyć, iż cena instalacji z samymi modułami fotowoltaicznymi jest uzależniona głównie od ich powierzchni. Natomiast cena systemu fotowoltaicznego typu CPV (Concentrated Photovoltaic) wykonanego z tanich elementów optycznych (np. soczewki Fresnela lub zwierciadła z tworzyw sztucznych) jest o wiele niższa [7, 8]. W związku z tym koszty opisanego systemu są mniejsze od standardowej instalacji fotowoltaicznej o tej samej mocy. Wadą wykorzystania skoncentrowanego promieniowania jest konieczność zastosowania ciągłego chłodzenia modułów fotowoltaicznych. Wzrost temperatury modułu powoduje spadek jego sprawności. Szacuje się, że spadek ten wynosi około 0,5%/°C. Problem ten jest też istotny dla systemów pracujących przy nieskoncentrowanym promieniowaniu słonecznym [9], dlatego na rynku dostępne są już różne wersje chłodzonych modułów fotowoltaicznych.

Jednym z takich rozwiązań jest moduł fotowoltaiczny z wbudowanym systemem chłodzenia, w którym ciepło jest odprowadzane do układu ogrzewania, wentylacji lub systemu c.w. budynku (hybryda fotowoltaiki i kolektora słonecznego) [10].

Układ pomiarowy

Na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie przeprowadzono wstępne badania nad pracą ogniwa PV w skupionym promieniowaniu słonecznym. Koncentrator promieniowania słonecznego umieszczony jest na dachu Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego. Rysunek 1 przedstawia schemat koncentratora, natomiast rysunek 2 jego widok.

Urządzenie to składa się z dwóch elementów koncentrujących umieszczonych na talerzu paraboloidalnym o średnicy 1,8m. Talerz stanowi element anteny satelitarnej i w opisanym układzie pełni rolę nośnika układów koncentrujących. Pierwszy element koncentrujący to lustro paraboloidalne o średnicy 1,2m, natomiast drugi to wyklejone folią refleksyjną obrzeże talerza otaczające lustro.

Całość zamocowana jest na układzie śledzącym położenie słońca, w którym zastosowano tzw. algorytm astronomiczny. Elementami wykonawczymi są dwa siłowniki liniowe umożliwiające zmianę kąta azymutu i elewacji [11].

Do badań użyto małego panelu polikrystalicznego firmy MULTICOMP – MC-SP0.8-NF-GCS [12], o powierzchni aktywnej ok. 80 cm², zamontowanego w pobliżu ogniska układu skupiającego.

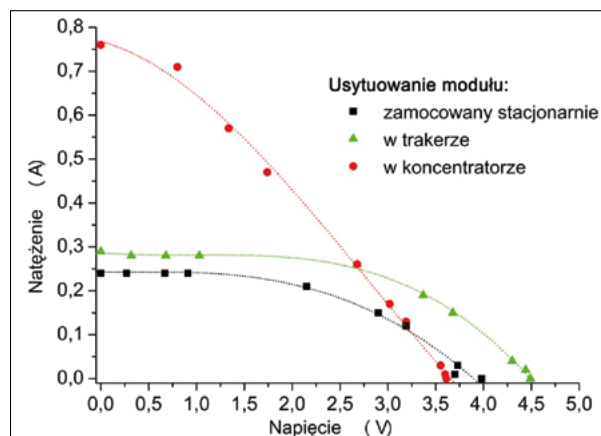
Badanie mocy modułu fotowoltaicznego

Porównanie mocy modułu pv dla trzech rozważanych przypadków

Przeprowadzono badanie trzech wariantów pracy ogniwa fotowoltaicznego dla następujących konfiguracji:

- moduł fotowoltaiczny zamocowany stacjonarnie w stojaku, nachylony pod kątem ok. 30° do poziomu (optymalny kąt nachylenia odbiornika promieniowania słonecznego dla okresu wiosno-lętniego, np. [13]),
- moduł fotowoltaiczny umieszczony w trakerze,
- moduł fotowoltaiczny znajdujący się

Rys.3.
Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-U) modułu PV w trzech rozważanych przypadkach



w pobliżu ogniska koncentratora.

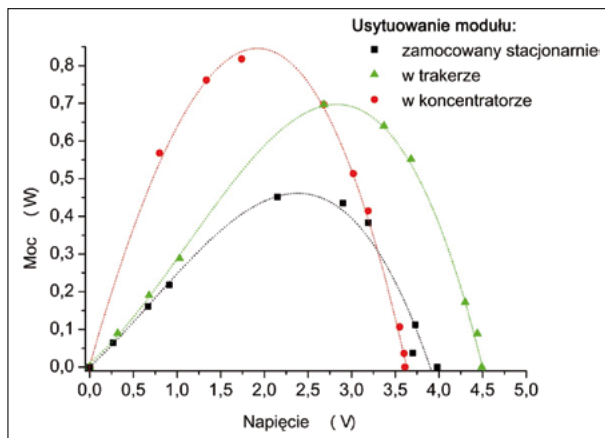
Dla każdego wariantu wykonano charakterystyki napięciowo-prądowe (rys. 3) i mocy (rys. 4) modułów. Podczas pomiarów moduły nie były chłodzone.

Na rysunku 3 widać, że największą wartość natężenia prądu zwarcia otrzymano dla ogniwa oświetlonego skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym, prąd ten jest trzykrotnie większy niż dla modułów umieszczonych w promieniowaniu nieskoncentrowanym. Widoczny jest również, inny przebieg krzywej I-U (szybki spadek natężenia prądu). Różnica w wartości prądu zwarcia pomiędzy panelem umieszczonym w stojaku a panelem umieszczonym na trakerze sięga około 15%. Przyjmując, że prąd zwarcia jest proporcjonalny do natężenia promieniowania można oszacować wartość współczynnika koncentracji, w tym wypadku równą około 3. Ta niezbyt wysoka wartość została ustalona na takim poziomie ze względu na problemy z odprowadzaniem ciepła z modułu.

Moc wyjściowa ogniwa dla skoncentrowanego promieniowania jest około dwukrotnie większa niż dla układu stacjonarnego i ponad 20% większa niż dla układu śledzącego.

Jednak interpretacja tych wyników nie jest taka oczywista, bowiem nie jest uwzględniana temperatura materiału półprzewodnikowego w badanym ogniwie. Temperatura ta jest najwyższa w przypadku skoncentrowanego promieniowania słonecznego, powodując zmniejszenie generowanej mocy elektrycznej. Problem ten można rozwiązać poprzez zastosowanie dodatkowego systemu chłodzącego. W kolejnych badaniach planuje się zastosowanie specjalnego układu chłodzenia ogniwa z blokiem wodnym.

Zauważyć jednak należy, że punkt optymalny (MPP – Maximum Power Point) w pomiarze dla ogniwa oświetlonego skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym przesunięty jest w kierunku niższych napięć w stosunku do pozostałych dwóch pomiarów. W praktycznych zastosowaniach, instalacje fotowoltaiczne sprzężone są jednak z kontrolerem śledzenia punktu maksymalnej mocy (MPP), niwelując wspomniany efekt.



Rys.4. Charakterystyki mocy modułu PV w trzech rozważanych przypadkach

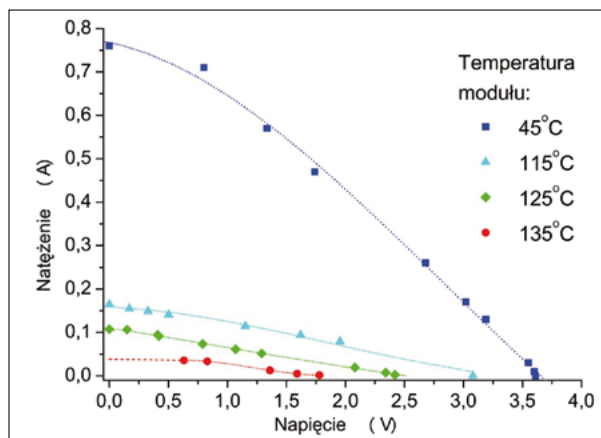
Spadek mocy wyjściowej modułu na skutek wysokich wartości temperatury

Wpływ wzrostu temperatury ogniwa fotowoltaicznego na ilość generowanej przez niego energii elektrycznej zbadano zmieniając temperaturę modułu fotowoltaicznego, poprzez ustawianie modułu w różnej odległości od ogniska koncentratora. Pomiar temperatury odbywał się przy zastosowaniu termopary typu K zamocowanej na tylnej powierzchni modułu. Na rysunkach 5 oraz 6 zaprezentowano charakterystyki I-U oraz P-U modułu dla różnych wartości temperatury. Pomiar przeprowadzono dla trzech wartości: 115°C, 125°C, 135°C i porównano z wynikami otrzymanymi w poprzednim badaniu gdzie ogniwo usytuowane w „bezpiecznej” odległości od ogniska koncentratora posiadało temperaturę 45°C. Temperatura 135°C okazała się być krytyczną. Podczas tego pomiaru moduł fotowoltaiczny uległ zniszczeniu, stąd odpowiednie charakterystyki dla 135°C są „niedokończone”.

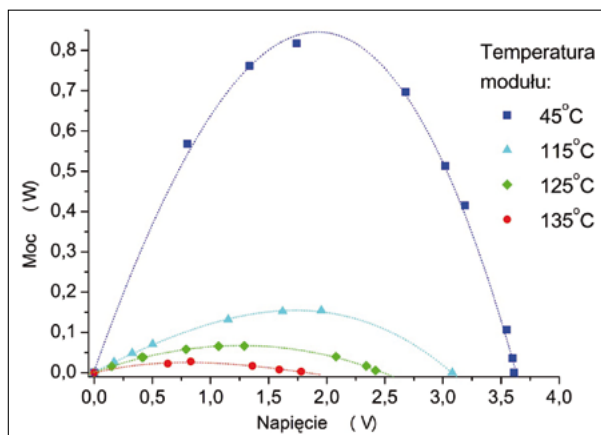
Dla 45°C prąd zwarcia modułu jest znacznie większy niż dla wyższej temperatury. Przyjmuje się, że wartość prądu zwarcia dla temperatury 25°C-65°C zmienia się nieznacznie, widoczne jest jednak, że dla wyższych wartości zmiany są już spore. Osiągane maksymalne wartości natężenia prądu dla modułu o temperaturze wyższej niż 100°C są o ponad 80% niższe niż w przypadku modułu o temperaturze 45°C. Ze względu na przegrzanie panelu fotowoltaicznego w temperaturze 135°C nie wyznaczono prądu zwarcia dla tej temperatury, jednak ekstrapolując można oszacować wartość prądu zwarcia na poziomie ok. 40 mA.

Z rysunku 6 widać istotny wpływ tem-

Rys.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe modułu PV dla różnych jego temperatur



Rys.6. Charakterystyki mocy modułu PV dla różnych jego temperatur



peratury na sprawność modułu. Dla wartości powyżej 100 °C, generowana przez moduł moc elektryczna jest ponad 5,5 krotnie niższa niż w przypadku modułu o niższej temperaturze tj. usytuowanym w bezpiecznej odległości od ogniska. Pomimo, że moduł był zbliżany do ogniska, co powodowało wzrost energii promieniowania na jego powierzchni, jego wydajność drastycznie spadała. Moc wygenerowana przez panel o temperaturze 135°C jest aż o ok. 85% niższa niż w przypadku mocy wygenerowanej przez panel o temperaturze 115°C.

Wnioski

Wykorzystanie skoncentrowanego promieniowania słonecznego w celu oświetlenia ogniwa fotowoltaicznego przynosi pozytywny efekt i powoduje zwiększenie mocy wyjściowej modułu PV. Osiągane wartości natężenia prądu zwarcia oraz mocy wyjściowej są w tym przypadku większe niż dla takiego samego modułu fotowoltaicznego umieszczonego w trakerze. Wykorzystanie jednak tej technologii wiąże się z pewnym zasadniczym problemem. Mianowicie, skierowanie na powierzchnię ogniwa fotowoltaicznego promieniowania słonecznego o wysokim natężeniu powoduje podniesienie jego temperatury. Objawia się to znacznym spadkiem sprawności konwersji energii promieniowania na energię elektryczną. W pewnych przypadkach (silne przegrzanie) moc może być niższa niż dla nieskoncentrowanego promieniowania słonecznego, a nawet, na skutek wysokiej temperatury, moduł może ulec zniszczeniu. Gdyby jednak panel fotowoltaiczny poddać ciągłemu i wydajnemu procesowi chłodzenia w trakcie jego pracy, to efektywność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną byłaby dużo wyższa. Umożliwia to budowę układu poligeneracyjnego – ciepło z chłodzenia mogłoby zostać użyte np. do przygotowania c.w. Takie układy mogą w przyszłości odgrywać coraz większą rolę i wypierać osobne systemy kolektorów słonecznych i fotowoltaiki, gdyż oferują jednocześnie ciepło i energię elektryczną. Spadek mocy cieplnej o ok. 10-15% (tyle energii promieniowania wykorzysta moduł fotowoltaiczny na konwersję na energię elektryczną) jest niewielki i może być niezauważalny dla użytkowników. Praca przy skoncentrowanym promieniowaniu słonecznym będzie powodować uzyskiwanie większej mocy – zarówno elektrycznej jak i cieplnej, co np. może spowodować, że w warunkach zimowych temperatura c.w. będzie wyższa, i wystarczająca do wspomaganie pracy domowych urządzeń grzewczych.

*Praca wykonana w ramach działalności statutowej Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, WEiP, AGH
„Badania uwarunkowań zrównoważonego rozwoju energetycznego”*

LITERATURA

- [1] P. Olszowiec, *Prąd i ciepło ze Słońca. Szkłane panele zamiast... dachówek i tynku*, Energia Gigawat, nr 5/2010, <http://www.cire.pl/pliki/2/pradicieplo-zeslonca.pdf> [ostatni dostęp: 24.07.2014r]
- [2] *Teoria systemów PV (fotowoltaicznych)*, <http://www.eborx.com/index.php?p=4&s=1> [ostatni dostęp: 24.07.2014r]
- [3] Z. Zapatołowicz, *Instalacje fotowoltaiczne i kierunki ich rozwoju*, Instal 11/2010, str. 40-42
- [4] M. Nemš, J. Kasperski, A. Bać, *Panorama wariantów instalacji wysokotemperaturowego, słonecznego ogrzewania budynku*, Instal 10/2011, str. 31-35
- [5] J. Godlewski., *Wydajna fotowoltaika – potencjalne możliwości*, Czysta Energia – nr 5/2013, str. 32-33.
- [6] Chandler D. L., *How to tap the sun's energy through heat as well as light*, [w:] <http://www.mit.edu/newsoffice/2014/how-to-tap-the-suns-energy-through-heat-as-well-as-light-0119.html>. [ostatni dostęp: 18.07.2014r]
- [7] <http://www.suncorepv.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=101> [ostatni dostęp: 18.07.2014r]
- [8] *Power generation with solar tracking systems: CSP vs CPV vs Flat PV, 2010*, [w:] <http://manfred.amoureux.free.fr/?p=71> [ostatni dostęp: 18.07.2014r]
- [9] A. Opiela, Z. Zapatołowicz, *Wpływ parametrów otoczenia na temperaturę pracy modułu fotowoltaicznego*, Instal 6/2014, str. 34-36
- [10] *Kolektory hybrydowe (PVT)*, <http://tehaco-energy.com/produkty/kolektory-sloneczne/hybrydowe-kolektory-sloneczne-pvt/> [ostatni dostęp: 18.07.2014r]
- [11] M. Filipowicz, P. Wajss, M. Tomski, M. Szubel, K. Sornek, M. Gastoł, E. Bożek, *Wykorzystanie skoncentrowanego promieniowania słonecznego w warunkach polskich*, Rynek Instalacyjny 12/2012, s.30-32.
- [12] Dokumentacja techniczna panelu PV – multicom, <http://www.farnell.com/datasheets/1671797.pdf> [ostatni dostęp: 18.07.2014r]
- [13] W. Smolec, *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa, 2000 (str. 204-205)