

ANALIZA PRACY KRZEMOWEGO OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO W SKONCENTROWANYM ŚWIETLE SŁONECZNYM

D. Węcel

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, Gliwice

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań modułu fotowoltaicznego (PV) wykonanego z krzemu krystalicznego i umieszczonego w skoncentrowanej wiązce promieniowania słonecznego. Zastosowano moduł przystosowany do pracy w warunkach Standard Test Conditions (STC), o kształcie prostokąta. Do skoncentrowania promieniowania wykorzystano wycinek zwierciadła parabolicznego pokrytego aluminiową folią. W celu utrzymania niskiej temperatury modułu fotowoltaicznego zastosowano układ chłodzenia wodą destylowaną. Wykonane badania pozwoliły na wyznaczenie podstawowych parametrów badanego ogniwa oraz jego charakterystyk prądowo-napięciowych i mocy. Wszystkie pomiary napięcia i natężenia prądu korygowano uwzględniając zmianę temperatury badanego ogniwa. Porównano otrzymane wyniki uzyskane w warunkach zbliżonych do STC z wynikami przy skupieniu promieniowania słonecznego za pomocą wykonanego zwierciadła.

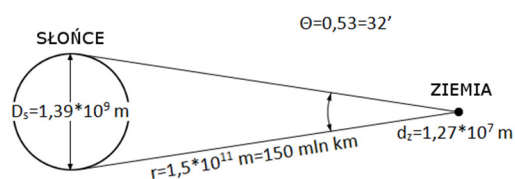
WSTĘP

Ogniwa fotowoltaiczne są obecnie powszechnie stosowane w wielu różnych gałęziach gospodarki. Cały czas dąży się do rozwoju istniejących technologii oraz prowadzi się intensywne prace pozwalające wykorzystać nowe materiały i zastosować nowe rozwiązania technologiczne. Wszystkie te działania zmierzają w kierunku: zmniejszenia kosztów produkcji, zwiększenia trwałości oraz zwiększenia ilości produkowanej energii z ogniwa o jednostkowej mocy. Cele te są realizowane poprzez: zwiększenie sprawności, efektywne wykorzystywanie promieniowania słonecznego, stosowanie cieńszych ogniw, ograniczenie strat odbicia, koncentrację promieniowania słonecznego na ogniwie (concentrator photovoltaic - CPV).

KONCENTRACJA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Odległość Słońca od Ziemi jest tak duża, że można je traktować jako punktowe źródło promieniowania,

a jednocześnie bezpośrednio promienie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi są do siebie równoległe. Ze względu na dużą odległość oraz straty w atmosferze, jednostkowy strumień energii padający na powierzchnię znajdującą się na Ziemi i ustawioną prostopadle do promieni jest stosunkowo niski. W warunkach standardowych wynosi 1000 W/m^2 i jest traktowany jako rozproszone źródło energii o stosunkowo małej gęstości energii. W celu uzyskania dużych mocy z energii promieniowania słonecznego konieczne jest wykonanie układu absorbującego promieniowanie o dużej powierzchni. W takich układach zwykle nie uzyskuje się wysokich sprawności.



Rys.1. Wymiary Ziemi i Słońca

Sposobem na podniesienie gęstości energii jest koncentracja promieniowania słonecznego. Ma ona na celu zamianę pierwotnej wiązki równoległej bezpośrednich promieni słonecznych na wiązkę skupioną padającą na określoną powierzchnię absorbera. Podstawowym parametrem charakteryzującym koncentraty jest tzw. geometryczny współczynnik koncentracji promieniowania. Jest on definiowany jako stosunek rzutu powierzchni koncentratora na płaszczyznę prostopadłą A_1 do kierunku promieniowania do powierzchni odbiornika A_2 (absorbera).

$$C = \frac{A_1}{A_2} \cdot \eta_c \quad (1)$$

gdzie η_c oznacza wydajność koncentratora.

Wydajność koncentratora jest to stosunek ilości promieniowania jakie teoretycznie może dotrzeć do aparatury wyjściowej (absorbera) do rzeczywistej ilości promieniowania słonecznego docierającego do aparatury wyjściowej.

Koncentraty wykorzystują tylko część całkowitego promieniowania słonecznego w postaci promieniowania bezpośredniego. Zwykle promieniowanie rozproszone i odbite nie jest skupiane w ognisku układu koncentratora ze względu na trudny

do określenia kąta padania wiązki promieniowania, a co przyczynia się do trudności w odpowiednim ustawieniu koncentratora.

Ze względu na pozorny ruch Słońca po sferze niebieskiej i ciągłą zmianę kąta padania promieni słonecznych na określony punkt na powierzchni Ziemi, układy do koncentracji wymagają pozycjonowania (stosowania tzw. solar trackerów). Pozycjonowanie zwiększa ilość energii jaką można uzyskać z promieniowania słonecznego w stosunku do układów nieruchomych, ze względu na konieczność ciągłego ustawiania powierzchni koncentratora pod odpowiedni kąt do wiązki promieniowania.

W zależności od wykonania i przeznaczenia koncentratory skupiają promieniowanie słoneczne punktowo lub liniowo. W celu skupienia liniowego stosuje się zwierciadła paraboliczne. W przypadku skupiania punktowego wykorzystuje się: zwierciadła, soczewki lub układy koncentratorów płaskich (heliostatów).

Układy do koncentracji promieniowania słonecznego na ogniwach fotowoltaicznych zaczęto stosować już w latach 70-tych XX wieku (Luque A. L., 2007). Był to jeden ze sposobów ograniczenia kosztów inwestycyjnych w instalacjach słonecznych, w których wykorzystywano bardzo drogie ogniwa fotowoltaiczne. Niestety nie uzyskano zadowalającej redukcji kosztów takich instalacji w porównaniu do płaskich i nieruchomych paneli fotowoltaicznych. Rozwój technologii produkcji ogniw fotowoltaicznych spowodował zdecydowane obniżenie ich ceny, co przyczyniło się do zmniejszenia zainteresowania technologią CPV. Mimo tego w ostatnich latach stale prowadzi się badania i budowane są tego typu instalacje. Obecnie na świecie moc instalacji CPV przyłączonych do sieci elektroenergetycznej przekracza 370 MW (Wiesenfarth M., 2017).

Rozróżnia się dwa podstawowe typy instalacji CPV w zależności od stopnia skupienia: HCPV- wysoka koncentracja $C = 300 \div 1000$ (wymagane jest intensywne chłodzenie, stosowane są ogniwa wielowarstwowe i bardzo precyzyjne układy śledzenia słońca), LCPV – niska koncentracja $C < 100$ (mniejsze wymagania układu chłodzenia, mogą być stosowane ogniwa krzemowe).

Główne korzyści ze stosowania układów CPV to: możliwość uzyskania wyższych sprawności przetwarzania bezpośredniego promieniowania słonecznego w energię elektryczną, możliwość wykorzystania ciepła odpadowego w układach z chłodzeniem wymuszonym, stabilna produkcja energii w ciągu dnia ze względu na stosowanie układów nadążnych, krótki czas zwrotu nakładów inwestycyjnych. Niestety tego typu instalacje mogą być stosowane tylko na obszarach o dużym bezpośrednim nasłonecznieniu.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

W badaniach przeprowadzonych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych do skoncentrowania promieniowania słonecznego

postanowiono wykorzystać zwierciadło wykonane z anteny satelitarnej typu offset pokrytą materiałem odbijającym promienie słoneczne w postaci folii aluminiowej (Rys.2). Podstawowe wymiary zwierciadła: wysokość $h = 72$ cm, szerokości $w = 66$ cm, głębokość $d = 7$ cm. Na podstawie wymiarów można obliczyć tzw. kąt offsetowy, długość ogniskowej oraz powierzchnię z jakiej jest skupiane promieniowanie słoneczne. Głównym parametrem określającym właściwości anteny i pozwalającym właściwie ją ustawić jest kąt offsetowy. W przypadku rozpatrywanej anteny kąt offsetowy został obliczony z zależności (2) i wynosi $23,57^\circ$.

$$\cos \theta = \frac{w}{h} \quad (2)$$

Długość ogniskowej układu optycznego jest miarą tego, jak silnie system jest zbieżny lub odchyła światło. W przypadku rozpatrywanej anteny długość ogniskowej wynosi $FL = 35,6$ cm, a została wyznaczona według zależności (3):

$$FL = \frac{w^3}{16 \cdot d \cdot h} \quad (3)$$

Ze względu na ustawienie zwierciadła pod kątem offsetowym w stosunku do padających promieni słonecznych, rzut powierzchni koncentratora na płaszczyznę prostopadłą do kierunku promieniowania jest w kształcie koła o powierzchni $A_1 = 0,342$ m².



Rys.2. Stanowisko pomiarowe

W instalacji pomiarowej jako absorber promieniowania słonecznego zastosowano moduł PV wykonany z krzemu monokrystalicznego. Moduł składa się z ośmiu ogniw połączonych szeregowo, które umieszczone są na płytce tekstolitowej i pokrytej przezroczystym tworzywem sztucznym. Takie wykonanie pozwalało na prawidłową pracę nawet przy umieszczeniu modułu w wodzie.

Tabela 1. Parametry modułu fotowoltaicznego

| Parametr | Wartość |
|--|----------------|
| Napięcie znamionowe U_{MPP} | 4 V |
| Znamionowe natężenie prądu I_{MPP} | 35 mA |
| Moc maksymalna P_{max} | 0,14 W |
| Wymiary zewnętrzne modułu (szerokość x wysokość x grubość) | 35 x 39 x 2 mm |
| Wymiary ogniwa fotowoltaicznego (szerokość x wysokość) | 32 x 38 mm |
| Waga | 5,5 g |

Podstawowe parametry modułu podane przez producenta dla warunków STC przedstawiono w tabeli 1. W celu określenia pozostałych parametrów modułu wykonano badania polegające na wyznaczeniu charakterystyki prądowo-napięciowej (I-U) w warunkach zbliżonych do STC oraz na zmierzeniu napięcia obwodu otwartego przy zmieniającej się temperaturze modułu fotowoltaicznego. Charakterystykę I-U badanego modułu uzyskano przy natężeniu promieniowania na powierzchni modułu $G = 816 \text{ W/m}^2$ i temperaturze pracy ok. 43°C . Na podstawie danych pomiarowych było możliwe wyznaczenie rezystancji szeregowej R_S i rezystancji bocznikowej R_{SH} , które są wykorzystywane przy korekcji danych pomiarowych ze względu na temperaturę i natężenie promieniowania (IEC norm No. 60891, 2009).

Rezystancja bocznikowa R_{SH} została wyznaczona przy wykorzystaniu współczynnika kierunkowego prostej, którą utworzono na podstawie punktów pomiarowych w pobliżu punktu I_{SC} (Rys.3). Wartość rezystancji bocznikowej stanowi odwrotność omawianego współczynnika i wynosi 4018Ω .

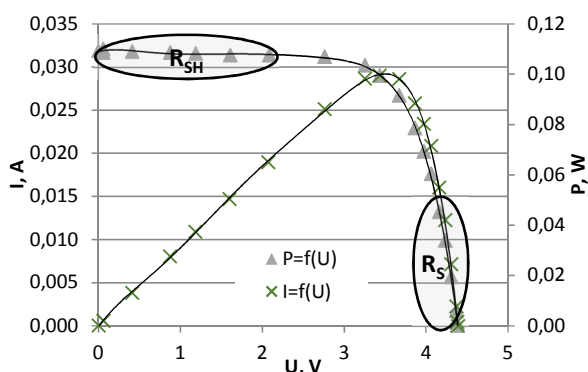
Rezystancja szeregowa została wyznaczana bazując na równaniu opisującym jednodiodowy model krzemowego ogniwa fotowoltaicznego (4).

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{q(U-I R_S)}{N_s n k_b T}} - 1 \right) - \frac{U + I R_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

gdzie I_0 natężenie prądu nasycenia, q ładunek elementarny, N_s ilość ogniw w panelu, n współczynnik jakości diody, k_b stała Boltzmanna, T temperatura ogniwa.

Przy wyższych napięciach ogniwa, zależność tą można uprościć ze względu na dominującą część członu wykładniczego. Dobierając odpowiednie wartości R_S wyszukuje się w sposób iteracyjny, liniowość funkcji (5):

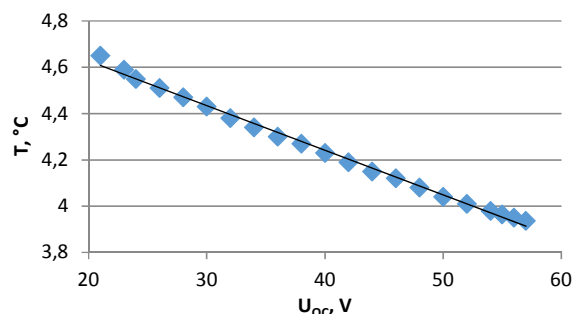
$$\ln \left(\frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \right) = f \left(\frac{U + I R_S}{N_s} \right) \quad (5)$$



Rys.3. Usytuowanie punktów pomiarowych wykorzystanych do wyznaczenia R_S i R_{SH}

Obliczenia wykonano dla zaznaczonego zakresu danych pomiarowych (oznaczonych jako R_S na Rys.3). Dla analizowanego ogniwa, zależność powyższa jest najbardziej zbliżona do linii prostej przy R_S wynoszącym $1,8 \Omega$. Wartość tą wyznaczono dla najmniejszej niepewności dopasowania punktów zależności (5) do linii prostej przy zadawanych wartościach R_S .

W celu określenia współczynnika temperaturowego napięcia β wykonano pomiary napięcia obwodu otwartego U_{OC} modułu przy stałym natężeniu promieniowania i zmieniającej się temperaturze (Rys.4). W badanym zakresie zmian temperatur, napięcie U_{OC} zmniejsza się liniowo o wartość $0,0193 \text{ V}/^\circ\text{C}$. Znając wcześniej wyznaczoną wartość napięcia $U_{OC} = 4,77 \text{ V}$ w warunkach STC można określić współczynnik temperaturowy napięcia β , który dla badanego modułu wynosi $-0,42 \% U_{OC}/^\circ\text{C}$.



Rys.4. Charakterystyka zmiany U_{OC} w funkcji zmian temperatury PV

Pozostałe parametry moduły fotowoltaicznego zostały przyjęte na podstawie danych literaturowych dotyczących monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych (da Costa Po J. M., 2011, Berthod C., 2016, Ponce-Alcántara S., 2014). Wszystkie parametry wykorzystywane przy korekcji danych pomiarowych zamieszczono w Tabeli 2.

Tabela 2. Przyjęte do obliczeń wartości parametrów modułu fotowoltaicznego

| | Parametr | Wartość |
|--|----------|----------------------------------|
| Napięcie obwodu otwartego | U_{OC} | 4,77 V |
| Natężenie prądu zwarcia | I_{SC} | 0,0319 A |
| Współczynnik temperaturowy natężenia prądu | α | 0,04 $\% I_{SC}/^\circ\text{C}$ |
| Współczynnik temperaturowy napięcia | β | -0,42 $\% U_{OC}/^\circ\text{C}$ |
| Współczynnik korekcji krzywej | κ | 0,004 $\Omega/^\circ\text{C}$ |
| Rezystancja szeregowa | R_S | 1,8 Ω |
| Rezystancja bocznikowa | R_{SH} | 4018 Ω |

Zastosowany układ koncentracji i absorber w postaci modułu fotowoltaicznego, pozwala na uzyskanie geometrycznego współczynnika koncentracji C na poziomie:

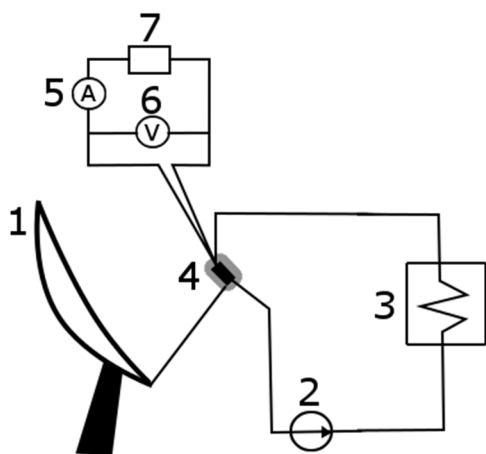
$$C = \frac{0,342}{0,032 \cdot 0,038} = 281 \quad (6)$$

W zastosowanej antenie offsetowej, skupiona wiązka promieniowania słonecznego teoretycznie ma kształt koła. W celu równomiernego oświetlenia modułu fotowoltaicznego, którego kształt jest prostokątny, należy umieścić go miejscu w którym skupiona wiązka promieniowania słonecznego jest wielkości koła o średnicy co najmniej równej przekątnej modułu fotowoltaicznego. W takiej sytuacji

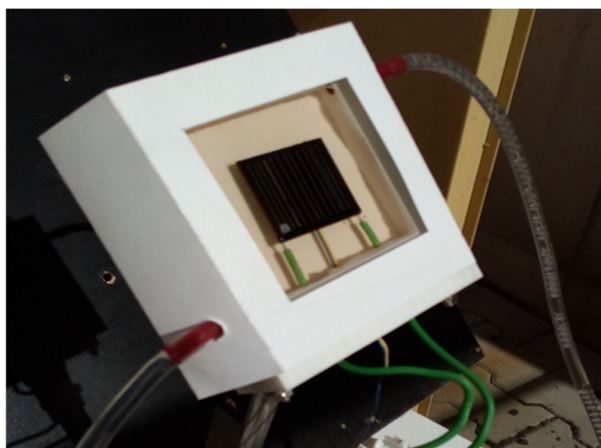
maksymalny współczynnik koncentracji możliwy do osiągnięcia w badanym układzie wynosi:

$$C = \frac{0,342}{\pi \cdot \frac{0,032^2 + 0,038^2}{4}} = 176 \quad (7)$$

W przedstawionych przypadkach współczynnik koncentracji wyznaczono przy braku strat w układzie skupiającym. Niedoskonałość geometrii anteny oraz zastosowanie aluminiowej folii niskiej jakości spowodowało niedokładne skupienie promieniowania słonecznego. Z tego względu bardzo trudne było umieszczenie absorbera w optymalnym miejscu i uzyskanie obliczeniowych wartości współczynnika skupienia. Dodatkowe straty promieniowania słonecznego docierającego do modułu fotowoltaicznego wprowadzał układ chłodzenia.



Rys.5. Schemat stanowiska pomiarowego; 1) zwierciadło, 2) pompa wody chłodzącej, 3) wymiennik ciepła, 4) ogniwo fotowoltaiczne umieszczone w pojemniku, 5) amperomierz, 6) woltomierz, 7) rezystor



Rys.6. Pojemnik do chłodzenia i stabilizacji temperatury modułu fotowoltaicznego umieszczony w skupionej wiązce promieniowania słonecznego

W celu właściwego chłodzenia oraz stabilizacji temperatury modułu fotowoltaicznego umieszczono je w specjalnie wykonanym pojemniku z jedną przeszkloną ścianą (Rys.6). W trakcie pracy pojemnik w całości był wypełniony wodą destylowaną i jednocześnie utrzymywany był stały przepływ wody za pomocą pompki. Woda była chłodzona za pomocą wężownicy umieszczonej w zbiorniku z zimną wodą. Temperatura modułu była mierzona na tylnej ścianie

za pomocą miniaturowego czujnika temperatury Pt1000.

W trakcie pomiarów moduł był obciążany za pomocą rezystora o regulowanym oporze (Rys.5). Każdą serię pomiarową wykonywano w przeciągu kilku minut. W tym czasie natężenie promieniowania słonecznego zmieniało się nie więcej niż o 5%. W trakcie każdej serii pomiarowej mierzono: natężenie prądu I_1 , napięcie U_1 , temperaturę T_1 oraz natężenie promieniowania słonecznego G_1 .

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Pomiary wykonywano przy wykorzystaniu naturalnego promieniowania słonecznego. Ze względu na przeprowadzanie badań dla różnych wariantów pracy modułu fotowoltaicznego, nie było możliwości utrzymania takich samych warunków promieniowania i temperatury pracy dla każdego przypadku. W związku z tym wszystkie wyniki pomiarów wymagały skorygowania ze względu na temperaturę i natężenie promieniowania. Wyniki pomiarów korygowano w odniesieniu do temperatury 25°C . Taka procedura pozwalała porównywać otrzymane wyniki dla różnych wariantów pracy modułu.

Metoda korekty danych pomiarowych

Korektę danych pomiarowych przeprowadzona na podstawie procedur zawartych w normie IEC No. 60891, a przykładowo opisanych w (da Costa Po J. M., 2011, Berthod C., 2016, Hecktheuer L. A., 2002). Wartości zmierzonych parametrów zostały skorygowane według przedstawionego poniżej algorytmu (Pó J.M., 2011). Korektę uzyskanych wyników przeprowadzono głównie ze względu na uzyskiwaną wyższą temperaturę modułu fotowoltaicznego niż temperatura w warunkach STC. Skorygowane wartości natężenia prądu oraz napięcia wyznaczano z zależności (8) i (9):

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot I_{SC} \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$U_2 = U_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot U_{OC} \cdot (T_2 - T_1) \quad (9)$$

Oznaczenia z indeksem 1 odnoszą się do wielkości zmierzonych, a z indeksem 2 do wielkości skorygowanych.

Wyniki badań

Głównym założeniem przeprowadzonych badań było określenie wpływu różnych warunków pracy modułu fotowoltaicznego na jego parametry. W związku z czym nie korygowano natężenia prądu ze względu na zmianę natężenia promieniowania G_1 . Nie było również możliwe zmierzenie natężenia promieniowania słonecznego w skupionej wiązce ze względu na ograniczony zakres pomiarowy stosowanych przyrządów.

W pracy skupiono się przede wszystkim na porównaniu charakterystyk prądowo-napięciowych (I_2 - U_2) oraz mocy (P_2 - U_2). Moc ogniwa fotowoltaicznego wyznaczano za pomocą zależności (10).

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 \quad (10)$$

Ponadto wyliczano moc maksymalną P_{max} oraz współczynnik wypełnienia (FF) modułu. Parametr ten określa jakość modułu fotowoltaicznego, a zależy od struktury i typu warstwy półprzewodnikowej, poziomu domieszkowania obu obszarów złącza p-n oraz temperatury złącza. Współczynnik wypełnienia określa w jakim stopniu charakterystyka prądowo – napięciowa kształtem przypomina prostokąt o bokach U_{OC} i I_{SC} . Współczynnik wypełnienia wyznaczany jest na podstawie równania (11).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (11)$$

Wszystkie pomiary wykonano przy oświetleniu modułu PV bezpośrednim promieniowaniem słonecznym. Warunki pracy modułu PV były następujące:

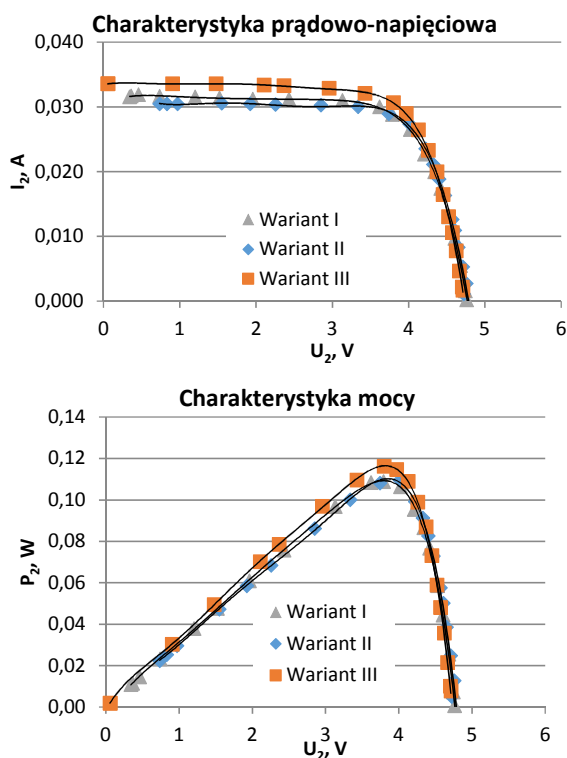
Wariant I – bez skupienia, bez chłodzenia (warunki referencyjne),

Wariant II – bez skupienia, bez chłodzenia, moduł umieszczony za szybą,

Wariant III – bez skupienia, z chłodzeniem wodnym,

Wariant IV – z koncentracją, z chłodzeniem wodnym.

W wariancie I moduł PV był ustawiony prostopadłe do padających bezpośrednio na niego promieni słonecznych i nie był chłodzony wodą. Wyniki pomiarów po skorygowaniu traktowano jako wartości referencyjne. W trakcie obciążania modułu średnia wartość natężenia promieniowania wynosiła $G_1 = 816 \text{ W/m}^2$, temperatura powietrza 25°C , a średnia temperatura modułu $T_1 = 43^\circ\text{C}$.

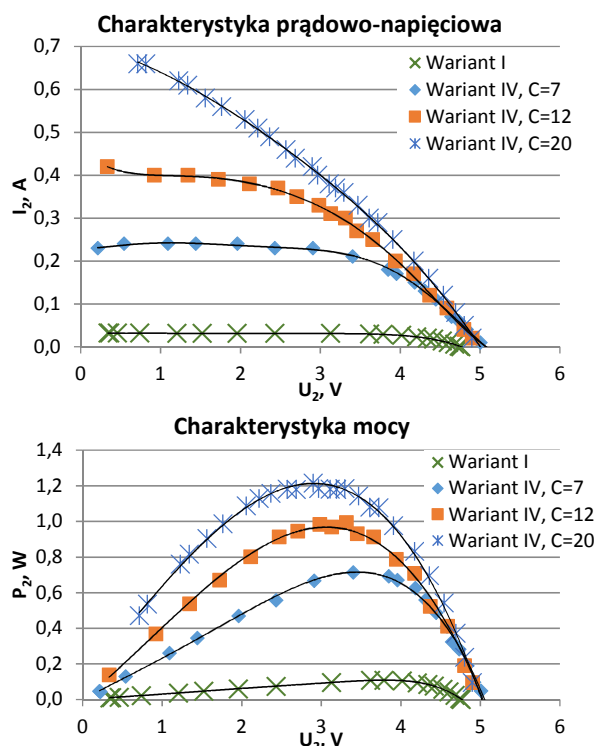


Rys.7. Charakterystyki modułu PV przy bezpośrednim oświetleniu modułu promieniowaniem słonecznym w różnych warunkach pracy

Charakterystyki prądowo-napięciowe oraz mocy badanego modułu przedstawiono na Rys.3. Po skorygowaniu wartości pomiarowych moc maksymalna wynosiła $P_{max} = 0,109 \text{ W}$, napięcie w punkcie mocy maksymalnej $U_{MPP} = 3,787 \text{ V}$ i natężenie prądu $I_{MPP} = 0,0288 \text{ A}$. Obliczony współczynnik wypełnienia $FF = 0,716$.

Następnie przebadano jak zmieniają się parametry pracy modułu przy umieszczeniu go za szybą w pojemniku służącym do chłodzenia modułu (Wariant II). W pierwszej kolejności nie wypełniano pojemnika wodą destylowaną. Ze względu na umieszczenie modułu w zamkniętym pojemniku za szybą znacznie pogorszyły się warunki wymiany ciepła, moduł nie był chłodzony na skutek konwekcji swobodnej powietrza. W związku z czym jego temperatura wzrosła do 66°C . Ze względu na umieszczenie modułu za szybą uzyskano niższe wartości natężenia prądu zwarcia oraz mocy maksymalnej w porównaniu z danymi referencyjnymi.

Kolejne pomiary wykonano przy umieszczeniu modułu w pojemniku wypełnionym wodą destylowaną. Zastosowane chłodzenie pozwoliło znacząco obniżyć temperaturę modułu do wartości odpowiadającej warunkom STC czyli 25°C , co przełożyło się na uzyskanie znacznie wyższych wartości U_{OC} . Zaobserwowano poprawę charakterystyk pracy modułu w porównaniu do wyników referencyjnych. Mogło to wynikać m.in. z odbijania się promieni słonecznych od białych powierzchni pojemnika w którym znajdował się moduł PV. Porównanie charakterystyk pracy przy bezpośrednim oświetleniu modułu po skorygowaniu danych pomiarowych przedstawiono na Rys.7.



Rys.8. Charakterystyki modułu PV znajdującego się w skoncentrowanej wiązce promieniowania słonecznego

Serie pomiarowe wykonane dla Wariantu IV zostały przeprowadzone również przy wykorzystaniu bezpośredniego promieniowania słonecznego, ale tym razem moduł PV został umieszczony w skoncentrowanej przez zwierciadło wiązce promieniowania. Dla tych serii pomiarowych nie zmierzono natężenia promieniowania słonecznego na module, ze względu na mały zakres pomiarowy stosowanych przyrządów. Wykonano trzy serie pomiarowe, za każdym razem korygując ustawienie zwierciadła oraz położenie modułu. Powodowało to zmianę stopnia skupienia C, który następnie można było oszacować na podstawie wyznaczonego natężenia prądu zwarcia I_{SC} . W kolejnych seriach pomiarowych uzyskiwano stopień skupienia C na poziomie 7, 12 i 20. Skorygowanie wyników pomiarów uwzględniało tylko temperaturę modułu PV. Charakterystyki przedstawiono na rysunkach Rys.8.

Porównanie parametrów modułu PV dla różnych warunków pracy przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Wartości P_{max} , FF, I oraz U w punkcie MPP dla różnych wariantów pracy modułu PV

| | Wariant I | Wariant III | Wariant IV $C \approx 7$ | Wariant IV $C \approx 12$ | Wariant IV $C \approx 20$ |
|---------------|-----------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| P_{max} , W | 0,109 | 0,116 | 0,714 | 0,995 | 1,21 |
| I_{MPP} , A | 0,0288 | 0,0306 | 0,21 | 0,30 | 0,42 |
| U_{MPP} , V | 3,79 | 3,80 | 3,40 | 3,32 | 2,90 |
| U_{OC} , V | 4,77 | 4,71 | 5,11 | 5,10 | 5,04 |
| I_{SC} , A | 0,0319 | 0,0335 | 0,24 | 0,42 | 0,66 |
| FF | 0,716 | 0,737 | 0,583 | 0,464 | 0,365 |

Skupienie promieniowania spowodowało wyraźny wzrost natężenia prądu zwarcia I_{SC} ale równocześnie spowodowało zmianę kształtu charakterystyk prądowo-napięciowych i mocy. Skutkowało to osiągnięciem punktu mocy maksymalnej przy coraz niższych napięciach. W związku z tym moc modułu fotowoltaicznego nie zwiększała się proporcjonalnie do zwiększania natężenia promieniowania skupianego na module. Wskazuje to na niedostosowanie badanego modułu do pracy przy promieniowaniu słonecznym znacznie wyższym od warunków STC. Spowodowane to jest m. in. stosunkowo wysoką wartością rezystancji szeregowej R_s .

WNIOSKI

Technologia CPV stanowi interesujące rozwiązanie pozwalające na zwiększenie sprawności i mocy uzyskiwanych z małych ogniw fotowoltaicznych. Zastosowanie układów koncentrujących promieniowanie słoneczne wymusza jednak stosowania bardzo skutecznego chłodzenia aby nie doszło do uszkodzenia ogniw fotowoltaicznych oraz tzw. solar trackerów czyli systemów precyzyjnie ustawiających koncentratory w kierunku Słońca co zasadniczo zwiększa koszty takich instalacji. Zasadniczą wadą układów CPV jest brak możliwości wykorzystania promieniowania rozproszonego, które w polskich warunkach klimatycznych stanowi ponad

połowę energii promieniowania słonecznego. W pracy przebadano moduł PV przystosowany do pracy w warunkach STC. Badania wykazały, że możliwe jest wykorzystanie takich modułów w układach koncentrujących promieniowanie słoneczne lecz należy się liczyć ze znaczną zmianą kształtu charakterystyk I-U i P-U oraz zmniejszeniem współczynnika wypełnienia FF. W analizowanym układzie, przy stopniu koncentracji na poziomie 20, uzyskana moc modułu była ponad 11 krotnie wyższa od wartości uzyskanej w warunkach referencyjnych. Zastosowanie efektywnego układu chłodzenia pozwoliło uchronić moduł PV przed uszkodzeniami związanymi z działaniem wysokich temperatur.

Praca naukowa zrealizowana w ramach badań statutowych.

LITERATURA

Berthod C., Strandberg R., Yordanov G. H., Beyer H. G., Odden J. O., 2016, *On the Variability of the Temperature Coefficients of mc-Si Solar Cells with Irradiance*, Energy Procedia, Volume 92, Pages 2-9

da Costa Po J. M., 2011, *Assessment of the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions*, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciencias, Departamento de Engenharia Geografica, Geofisica e Energia,

Hecktheuer L. A., Krenzinger A., Prieb C. W. M., 2002, *Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences vol.24 no.1 Rio de Janeiro, ISSN 0100-7386

IEC norm No. 60891, 2009, *International Electrotechnical Commission, Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*, 2nd edition

Luque A. L., Andreev V. M., 2007, *Concentrator Photovoltaics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-68796-2

Pó J.M., Los A., van Sark W.G.J.H.M., 2011, *Assessment of STC conversion methods under outdoor test conditions*, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in Hamburg, Germany

Ponce-Alcántara S., Connolly J. P., Sánchez G., Míguez J. M., Hoffmann V., Ordás R., 2014, *A Statistical Analysis of the Temperature Coefficients of Industrial Silicon Solar Cells*, Energy Procedia, Volume 55, Pages 578-588

Wiesenfarth M., Philipps S. P., Bett A. W., Horowitz K., Kurtz S., 2017, *Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, National Renewable Energy Laboratory NREL, Version 1.3