

Grażyna FRYDRYCHOWICZ-JASTRZĘBSKA*
Artur BUGAŁA*

UKŁADY FOTOWOLTAICZNE WSPÓŁPRACUJĄCE Z KONCENTRATORAMI

Scharakteryzowano układy fotowoltaiczne z koncentratorami o niskiej (*LCPV*) jak i wysokiej koncentracji (*HCPV*). Przedstawiono możliwości ich pracy w różnych warunkach, przy czym w szczególności uwzględniono wpływ temperatury i kąta koncentracji. Zaprezentowano najnowsze rozwiązania, w tym Spin cell, Ephocell, Interdigitated Back Contact (*IBC*), Luminescent Solar Concentrator (*LSC*), High Concentration PhotoVoltaic Thermal (*HCPVT*), Concentration PhotoVoltaic (*CPV*) i ich efektywność.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwa słoneczne, sprawność, koncentrator, konwersja fotowoltaiczna

1. WPROWADZENIE

Koncentratory są to optyczne systemy ogniskowania i wzmacniania światła słonecznego. Należą do nich m.in.:

- rynnna paraboliczna oraz soczewka Fresnela, które charakteryzują się dużym stosunkiem powierzchni apertury wejściowej do wyjściowej,
- układy, w których występuje duże "pole widzenia". Dotyczy głównie przypadków o znacznym udziale promieniowania rozproszonego oraz w układach o mniejszej dokładności układu śledzącego,
- wielostopniowe układy koncentratorów z soczewką Fresnela umieszczoną na odbijającej światło rynnne w kształcie litery V.

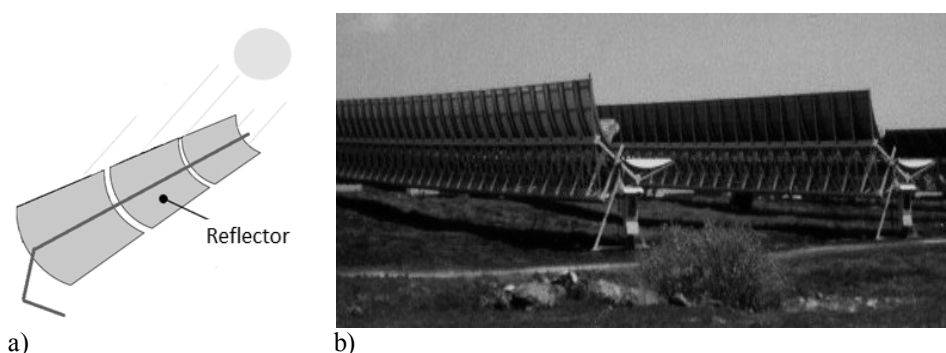
W ogniwach słonecznych najczęściej stosuje się dwa systemy koncentratorowe: soczewkowe, wykorzystujące zjawisko załamania i zwierciadła, bazujące na zjawisku odbicia. Systemy skupiają promieniowanie liniowo lub punktowo. W rozwiązaniu talerzowym maksymalna koncentracja teoretyczna promieniowania osiąga wartości od 12 000 do 104 000, w zależności od współczynnika odbicia. Praktycznie nie przekracza wartości od 820 do 4800. Zastosowanie soczewek Fresnela daje niższe efekty koncentracji [9]. W wyniku koncentracji, na powierzchni modułu zwiększa się gęstość mocy promieniowania, można zastosować mniejszą powierzchnię PV, co prowadzi do obniżenia kosztów. W tym rozwiązaniu koncentrator powinien mieć wbudowany system nadążny [2].

* Politechnika Poznańska.

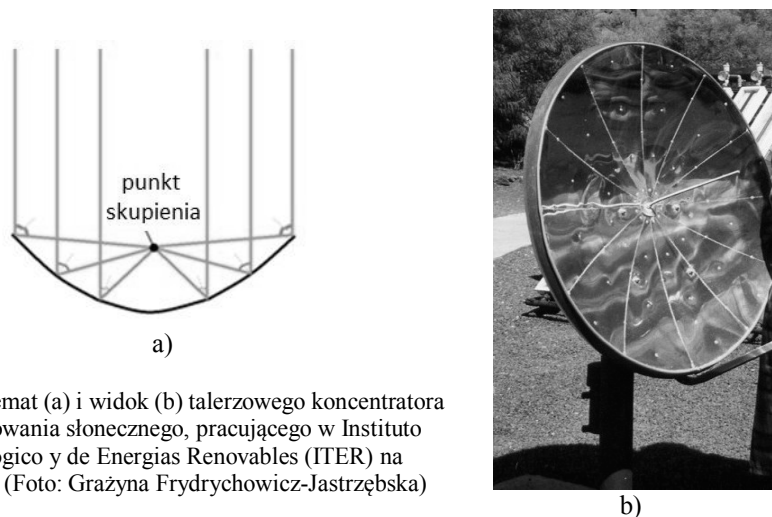
2. WSPÓLPRACA KONCENTRATORÓW Z OGNIWAMI SŁONECZNYMI

Systemy koncentrujące są najbardziej korzystne tam, gdzie występuje przewaga składowej bezpośredniej promieniowania. Buduje się je jako jednostki o mocy od 20 do 35 kWp.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono schematy wybranych koncentratorów oraz ich odpowiedniki pracujące w ITER na Teneryfie.



Rys. 1. Schemat (a) i widok (b) cylindrycznego (rurowego) koncentratora promieniowania w Instituto Tecnológico y de Energias Renovables (ITER) na Teneryfie.,
(Foto: Grażyna Frydrychowicz-Jastrzębska)

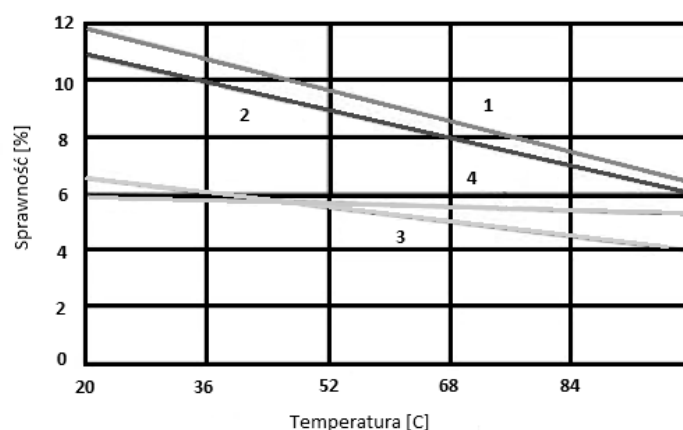


Rys. 2. Schemat (a) i widok (b) talerzowego koncentratora promieniowania słonecznego, pracującego w Instituto Tecnológico y de Energias Renovables (ITER) na Teneryfie. (Foto: Grażyna Frydrychowicz-Jastrzębska)

Koncentracja promieniowania jest przyczyną podwyższenia temperatury na powierzchni modułu. Ma to negatywny wpływ na parametry i charakterystyki ogniwa. Sprawność ogniw wrażliwych na zmiany temperatury obniża się z jej

wzrostem (spadek sprawności o 0,35 - 0,45%/1°). Nagrzanie ogniwa powyżej dopuszczalnej wartości, wskutek znacznej koncentracji może doprowadzić nawet do jego zniszczenia. Konieczne jest zatem chłodzenie, względnie konwersja kombinowana. Ze względu na zależność sprawności ogniów od temperatury, do współpracy z ogniwami krzemowymi stosuje się systemy fotowoltaiczne o niskiej koncentracji (od 2 do 10) światła LCPV (*Light Concentration Photovoltaic*). Taka instalacja mimo zwiększonej wydajności nie wymaga chłodzenia.

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ temperatury na charakterystyki wybranych ogniów słonecznych [4].



Rys. 3. Sprawność wybranych ogniów w funkcji temperatury; przy gęstości mocy promieniowania 1000 W/m². Objaśnienia: ogniwo krzemowe SR-100 (1), ogniwo krzemowe SRT-50 (2), tandem amorficzny MST-50 MV (3), ANTEC SOLAR (4)

Tylko ogniwa z arsenku galu nie wykazują dużych zmian parametrów w zakresie podwyższonej temperatury, nawet do 400 °C. Pięciokrotny wzrost koncentracji do wartości $C = 900$ powoduje spadek sprawności ogniów z arsenku galu o około 1,5% [4]. W tym przypadku można stosować systemy fotowoltaiczne o wysokiej koncentracji światła HCPV (*High Concentration Photovoltaic*), współpracujące z dwuosiowymi systemami nadążnymi. Układ wyposażony jest w monitoring.

W elektrowni Santa Pola, rejon Alicante w Hiszpanii, z całkowitej liczby 151 modułów polikrystalicznych pracujących w układzie nadążnym dwuosiowym, dodatkowo 27 wyposażonych jest w koncentrację o wysokim współczynniku (HCPV). Ze względu na wybraną lokalizację zastosowanie wysokiego stopnia koncentracji HCPV powinno być korzystne. Szczegółowa analiza po roku pracy elektrowni wykazała, że energia generowana przez konwencjonalne ogniwa osiągnęła zyski większe od planowanych (występowało większe nasłonecznienie, niż wynikało to z danych meteorologicznych), moduły z wysoką koncentracją przyniosły znacznie mniejsze efekty niż oczekiwano, co wykazano w tabeli 1.

Tabela 1. Produkcja energii w elektrowni PV Santa Pola Alicante (Hiszpania), wartości przewidywane i rzeczywiste [10]

	Teoretyczna generacja energii GWh	Rzeczywista generacja energii GWh	$\Delta\%$
Polikrystaliczne z HCPV	0.270	0.065	-76 %
Polikrystaliczne 2-osiowe	1.430	1.485	+3.4 %
Cała instalacja	1.700	1.550	-9 %

3. PRZEGLĄD NAJNOWSZYCH ROZWIĄZAŃ I ICH EFEKTYWNOŚĆ

Do rozwiązań współpracujących z koncentratorami należą krzemowe ogniwa typu IBC (*Interdigitated Back Contact*) oraz ogniwa punktowo-kontaktowe. Przy współczynniku $C = 30$, ich sprawność wynosi $\eta = 18\%$.

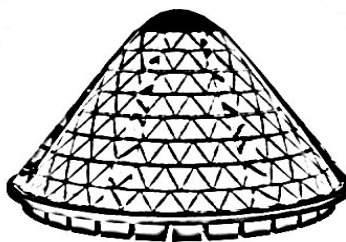
Koncentratory mogą znaleźć zastosowanie do ogniskowania i wzmacniania wiązki promieniowania padającej na ogniwo tandemowe, nawet dla dużych współczynników koncentracji. Znane są projekty Moon z 1978 roku i Borden z 1981 roku. W pierwszym zastosowano 2 ogniwa GaAs i Si. Przy współczynniku $C = 145$ tandem osiągnął sprawność $\eta = 28,5\%$. W skład drugiego tandemu wchodzi 10 ogniw, uzyskano sprawność $\eta = 20,5\%$ [3].

Liczne badania skupiają się wokół koncentratorów luminescencyjnych LSC (*Luminescent Solar Concentrator*). Stosuje się tu rozwiązanie w formie folii polimerowej, zawierającej centra luminescencyjne. Ich rolę spełniają kropki kwantowe, nanomateriały domieszkowane jonami ziem rzadkich oraz barwnikami perylenowymi nowej generacji, w tym dcm-pyran, coumarin 151, styryl 9 M, [6]. Centra absorbują promieniowanie. Technologia pozwala na silne absorbowanie promieniowania, przede wszystkim w zakresie fal do 950 nm oraz maksimum emisji przy około 1000 nm (bliskie jedności). Dzięki lepszemu dopasowaniu ogniwa do padającego promieniowania można zapobiec utracie promieniowania podczerwonego i UV [13]. Rozwiązanie umożliwia obniżenie kosztów (półprzewodnik na bazie polimeru). Koncentratory luminescencyjne nie wymagają układu nadążnego. Problematykę badawczą z tego zakresu rozwijają naukowcy w ramach programu "Fullspectrum" Unii Europejskiej [6]. Inne rozwiązanie, ogniwa słonecznych współpracujących z koncentratorami, należy do naukowców z Katalonii, którzy przedstawili projekt zwiększenia wydajności konwersji PV, w wyniku zastosowania koncentratorów luminescencyjnych. W rozwiązaniu Ephocell (*Smart Light Collecting System For The Efficiency Enhancement Of Solar Cells*) sprawność wzrasta wskutek włączenia do procesu, konwersji zewnętrznej modulacji natężenia promieniowania, co daje lepsze zsynchronizowanie długości fal i zdolności absorpcyjnych odbiornika [12].

Sprawności ogniw z koncentratorami osiągają już wartości ponad 40%, najlepsze wyniki należą do: National Renewable Energy Laboratory NREL 37%, Boeing Spectralab-odpowiednio-39%. MEREG GmbH (*Material Energy Recoverz Engineering*) deklaruje sprawność 40%. Stanowi ono kombinację półprzewodników i "color selective reflective interference films". Wiązka światła, po rozszczeniu na barwy, przetwarzana jest w półprzewodnikach dostosowanych do długości fal promieniowania. Procesowi temu można również poddać promieniowanie rozproszone, w tym przypadku sprawność jest dużo niższa. Najlepsze efekty daje zastosowanie tzw. "stosu koncentratorowego" (ogniwo wielowarstwowe z dodatkową warstwą przeciwo odbiciową) [4]. W Polsce, gdzie promieniowanie słoneczne charakteryzuje się dużym udziałem składowej rozproszonej, wskazane jest stosowanie opisanego rozwiązania [5].

Bardzo obiecujący jest projekt J.H. Karpa z Uniwersytetu w San Diego w Kalifornii, który w 2010 roku opracował prototyp koncentratora PV, w technologii Spin Cell, bazujący na mikrooptyce solarnej. Jest to stożek pokryty ogniwami w kształcie trójkątów, pokazany na rysunku 4 [7, 8].

Firma V3Solar (Projekt Nectar Design) prowadziła badania dla rozwiązania stożkowego. Spin Cell wychwytuje promieniowanie i przekształca je na energię elektryczną, po czym obraca się, zanim wzrośnie temperatura panelu, co skutkowałoby obniżeniem sprawności. Koncentrator tworzy hermetyczną warstwę zewnętrzną. Stożek umieszczony jest na podstawie wyposażonej w elektromagnesy, zasilane energią z konwersji. Konwersję z zastosowaniem ogniw stożkowych charakteryzuje 20-krotnie większa efektywność niż dla ogniw tradycyjnych.

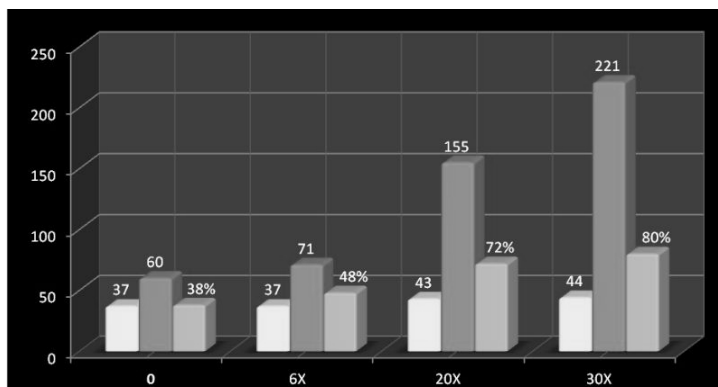


Rys. 4. Stożek fotowoltaiczny

Na rysunku 5 zestawiono wartości temperatury modułów standardowych i Spin Cell, pracujących z koncentracją sześć-, dwudziesto- i trzydziestokrotną, z przypadkiem-bez koncentracji. Ostatni słupek w każdym zestawieniu obrazuje różnicę wyrażoną w %.

Jedną z najwyższych sprawności konwersji 44,4% osiągnęła dla zestawu trójzłączowego ogniw z koncentratorem firma Sharp. Uzyskana sprawność została oficjalnie potwierdzona przez Instytut Fraunhofera Solar Energy Systems w Niemczech. Sharp zastosował stos trzech warstw pochłaniających promieniowanie,

w ich skład wchodzi pierwiastki IN, Ga, As. Firma prowadzi badania nad ogniwami trójzłączowymi od ponad 10 lat [14]. W 2013 roku kooperacja Soitec, DEA-Leti oraz instytut Helmholtz Zentrum Berlin uzyskała rozwiązanie o sprawności 44,7% [17].



Rys. 5. Możliwości obniżenia temperatury modułu PV w wyniku wprowadzenia rozwiązania Spin Cell [17]

Naukowcy z Ben-Gurion University (BGU) z Negev w Izraelu zaprojektowali w 2012 roku nowe rozwiązanie koncentratora z ogniwem słonecznym, charakteryzujące się wydajnością przewyższającą 40%. Możliwe jest tu stosowanie krzemu, który zasadniczo nie jest przydatny przy wysokich koncentracjach [1].

Badacze z IBM, Airlight Energy pracują nad efektywnym systemem fotowoltaicznym *High Concentration PhotoVoltaic Thermal* (HCPVT) [15].

Układ bazuje na antenie o parabolicznym kształcie i wnętrzu pokrytym wieloma ruchomymi lustrami. Zwierciadła są sterowane i ustawiają się pod najbardziej optymalnym kątem w stosunku do padania promieni słonecznych. Przewiduje się, że będą zdolne do przekształcenia ponad 80 % energii promieniowania. Zastosowano chłodzenie wodą morską, przy czym woda odprowadzając ciepło z układu paruje, następnie jest skraplana i już bez soli, po dalszym uzdatnieniu, wykorzystywana jako woda pitna.

Inne rozwiązanie badaczy z IBM dotyczy współpracy ogniw cienkowarstwowych z koncentratorami *Concentration PhotoVoltaic* (CPV), otrzymano rekordowy wynik 230 W/cm² powierzchni ogniwa, czyli pięciokrotnie więcej niż w przypadku typowego ogniwa krzemowego. Jest to możliwe dzięki innowacyjnej technologii chłodzenia, pozwalającej obniżyć temperaturę ogniw z ponad 1600 do 85°C. Do odprowadzania ciepła zastosowano warstwę ciekłego materiału z galu i indu [16].

Rozwiązania ogniw z koncentratorami zastosowano m.in. w elektrowniach fotowoltaicznych i słonecznych Andasol, Lujhu Township i Maricopa Solar.

4. PODSUMOWANIE

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój technologii koncentratorów (CPV). Szacuje się, że moc instalacji wzrośnie do 1,362 GW w 2020 roku, wzrost ma być nawet o 750% w stosunku do roku 2013 (160 MW).

Sprawność ogniw z koncentratorami przekroczyła w 2013 roku 44%, a Amonix produkuje już moduły o wydajności 34,2%.

Rozwojowi technologii CPV sprzyja także spadek kosztów produkcji, ich obniżenie w okresie od 2012 do 2013 roku (dla HCPV) wyniosło 25,8%. Ta tendencja utrzyma się na poziomie 15% do końca 2017 roku.

LITERATURA

- [1] Braun A., Vossier A., Katz E. A., Ekins-Daukes N.: Multiple-bandgap vertical-junction architectures for ultra-efficient concentrator solar cells. *Energy & Environmental Science*, 2012; 5 (9): 8523.
- [2] Frydrychowicz-Jastrzębska G., Bugała A.: Comparison of the efficiency of solar modules operating with a two-axis follow-up system and with a fixed mount system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, 1, s. 63-65.
- [3] Jarzębski Z.M.: Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna, PWN Warszawa 1990.
- [4] Jastrzębska G.: Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, WKŁ, Warszawa 2013.
- [5] Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne, WNT, Warszawa 2009.
- [6] Jeremiasz O, Sarnecki J., Nikiel W., Teodorczyk N., Wnuk K., Kozłowski R, Gawlik D.: Luminescencyjne koncentratory energii promieniowania słonecznego w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, *Elektronika* 2010, 51 (5), s. 83-86.
- [7] Karp J.H., Tremblay E.J., Ford J.E.: Planar micro-optic solar concentrator, *Optics Express*, Vol. 18, Issue 2, 2010, s. 1122-1133.
- [8] Karp J.H., Tremblay E.J., Ford J.E.: Planar micro-optic concentration using multiple imaging lenses into a common slab waveguide," *Proc. SPIE* 2009, s. 7407-11.
- [9] Lewandowski W.M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii, WNT, Warszawa 2006.
- [10] Lopez D., Munoz R., Valero S.: Analysis of a Ground - Mounted Double Axis Photovoltaic Installation in Spain, *International Conf. on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'11*, Canary Island 2011.
- [11] www.eupvsec-proceedings.com (dostęp: 03.05.2012r.)
- [12] www.ist-world.org (dostęp: 16.06.2012r.)
- [13] www.newloks.int.pan.wroc.pl (dostęp: 13.08.2012r.)
- [14] www.sharp-world.com (dostęp: 17.08.2012r.)
- [15] <http://nt.interia.pl/technauka/news-ogniwa-zdolne-do-koncentracji-mocy> (dostęp: 02.06.2012r.)
- [16] www.katalog.xtech.pl (dostęp: 20.01.2014r.)
- [17] www.gramwzielone.pl (dostęp: 24.11.2013r.)

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH CONCENTRATORS

Paper presents photovoltaic systems with concentrators with a low (LCPV) and high (HCPV) level of concentration. The possibilities of work under different conditions, especially influence of temperature and concentration angle are described. The latest solutions with their efficiency like Spin cell, Ephocell, Interdigitated Back Contact (IBC), Luminescent Solar Concentrator (LSC), High Concentration PhotoVoltaic Thermal (HCPVT), Concentration PhotoVoltaic (CPV) are presented.