

SPRAWNOŚĆ SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH - WYBRANE ZAGADNIENIA

Rafał Kwiecień

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Streszczenie. W artykule podjęto rozważania nad możliwościami zwiększenia ilości energii wyprodukowanej w systemie fotowoltaicznym przy zmianie wybranych parametrów. Przedstawione zostały podstawowe konfiguracje systemów fotowoltaicznych autonomicznych i połączonych z siecią energoelektryczną. Omówiono poszczególne elementy składowe systemu i ich wpływ na ilość pozyskanej energii elektrycznej. Skupiono się nad możliwościami poprawienia efektywności samego generatora fotowoltaicznego, jako elementu o najniższej sprawności poprzez ingerencję w jego konstrukcję i zmianę parametrów pracy.

Słowa kluczowe: sprawność systemów fotowoltaicznych, alternatywne źródła energii, energia słoneczna

The energy efficiency of photovoltaic systems - selected issues

Abstract. In the article there is consideration of increasing the amount of energy generated from photovoltaic system when changing parameters. The basic configurations of stand-alone and grid-connect photovoltaic systems were described. There was shown the various system components and their influence on the amount of electrical energy. It focuses on the possibilities of improve the efficiency of the PV generator as a part of the system with lowest efficiency factor. It can be possible with interfering on its structure and changing work parameters.

Keywords: photovoltaic system efficiency, alternative energy sources, solar energy

Wstęp

Coraz częściej ludzkość zastanawia się nad pełniejszym wykorzystaniem energii i stosowane są urządzenia o coraz większych sprawnościach przetwarzania energii. Dynamicznie rozwijającą się dziedziną wiedzy jest fotowoltaika zajmująca się aspektami bezpośredniego pozyskiwania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego. Koszt tak wyprodukowanej energii jest wciąż jeszcze zbyt wysoki biorąc pod uwagę zwrot inwestycji w poszczególne składniki systemu fotowoltaicznego (PV). Nie można pominąć również problemów związanych z nieciągłością dostawy takiej energii i zmieniającą się wartością natężenia promieniowania słonecznego. Łatwo jednak zaobserwować ciągle rosnące ceny energii elektrycznej dostarczanej ze źródeł energii konwencjonalnej.

Energia z paliw kopalnych staje się mało opłacalna i nieekologiczna. Fotowoltaika w istotny sposób staje naprzeciw problemom energetycznym i środowiskowym współczesnego świata. Wkrótce może okazać się, że będziemy zmuszeni do korzystania ze źródeł alternatywnych nie tylko z powodu kończących się zapasów paliw kopalnych, ale i coraz większych nacisków na ekologię ze strony Unii Europejskiej i organizacji wspierających środowisko naturalne. Coraz częściej zastanawiamy się nad poszanowaniem energii, staramy się jej mniej marnować i uzyskiwać lepsze rezultaty mniejszym kosztem.

Wciąż wysokie są ceny poszczególnych elementów systemów PV, biurokracja i szczegółowe przepisy prawne skutecznie zniechęcają do stosowania fotowoltaiki. Przeciw korzystaniu z energii Słońca stają również warunki klimatyczne, w których się znajdujemy, a także nasłonecznienie w ciągu roku.

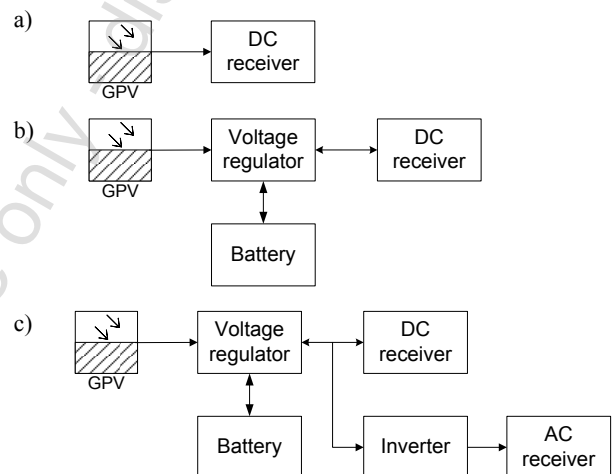
Warto jednak pamiętać, że nawet w pochmurne dni istnieje możliwość wyprodukowania z modułów pewnej ilości energii (promieniowanie odbija się od chmur a niższa temperatura sprzyja sprawności GPV). Z powierzchni Słońca do kuli ziemskiej dociera promieniowanie falowe o mocy $1,17 \cdot 10^{17}$ W. Światowe zapotrzebowanie na moc wszystkich postaci energii jest rzędu $0,01 \cdot 10^9$ MW. Na podstawie tych danych widać, że wartość energii docierającej do Ziemi jest około 17500 razy większa niż światowe zapotrzebowanie na nią [3].

1. Podstawowe konfiguracje systemów fotowoltaicznych

Sprawność generatora fotowoltaicznego (GPV) w znacznym stopniu zależy od jego konfiguracji, a dokładniej od rodzaju obciążenia. Można dokonać podstawowego podziału systemów fotowoltaicznych na autonomiczne (ang. stand alone)

i włączone do sieci elektroenergetycznej (ang. on-grid).

Te pierwsze można podzielić na systemy ze źródłem buforowym (bateria akumulatorów, kondensatorów) i nie posiadające magazynu energii [15].



Rys. 1. Przykładowe konfiguracje systemów autonomicznych: a) bez źródła buforowego, b) ze źródłem buforowym zasilający odbiornik prądu stałego, c) ze źródłem buforowym zasilający odbiorniki prądu stałego i przemiennego

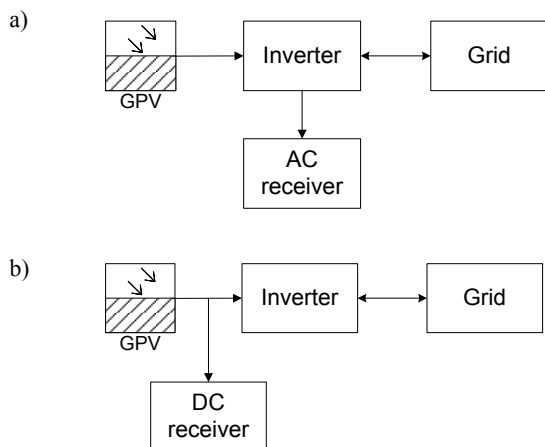
Fig. 1. Exemplary configurations of stand-alone systems: a) without buffer source, b) with buffer source supplying DC receiver, c) with buffer source supplying DC and AC receivers

Konfiguracja z rys. 1. a jest najprostszą strukturą pozwalającą na niskie koszty montażu i eksploatacji. Brak przekształtnika energoelektronicznego między GPV a odbiornikiem sprawia, że pominięte zostają straty na konwersję prądu i dopasowanie generatora do obciążenia. Niestety układ taki ma swoje wady. Do najistotniejszych trzeba zaliczyć brak ciągłości dostaw prądu i brak ciągłego dopasowania generatora do obciążenia, co pozwalałoby na pracę GPV w punkcie mocy maksymalnej (MPP) i maksymalne wykorzystanie mocy. Optymalizacja pracy tej konfiguracji polega na takim dopasowaniu charakterystyki wyjściowej GPV i wejściowej obciążenia, aby niezależnie od natężenia promieniowania słonecznego i temperatury ogniw charakterystyka obciążenia w jak najszerszym zakresie znajdowała się blisko punktów mocy maksymalnej GPV [2].

Struktura ze źródłem buforowym (rys. 1.b) wyposażona w regulator napięcia pozwala na całkowite wykorzystanie energii wyprodukowanej w GPV przy odpowiednio dobranej mocy obciążenia. Niewykorzystana energia jest magazynowana i można

ją spożytkować na wyrównanie różnic w produkcji energii spowodowanych wzrostem temperatury modułów lub spadkiem natężenia promieniowania. Regulator napięcia zabezpiecza kosztowny układ akumulatorów przed przeładowaniem, lecz nie ma układu dopasowującego obciążenie do generatora.

Konfiguracja z rys.1.c zapewnia zasilanie odbiorników pracujących przy napięciu przemiennym. Dodać należy, że inwerter generuje straty związane z konwersją energii prądu stałego na prąd przemienny, dlatego najlepszym przypadkiem byłaby dominacja obciążenia prądu stałego w całkowitym bilansie wykorzystania energii.



Rys. 2. Przykładowe konfiguracje systemów połączonych z siecią elektroenergetyczną: a) zasilający odbiorniki prądu przemiennego, b) zasilający odbiorniki prądu stałego i przemiennego

Fig. 2. Exemplary configurations of grid-connect systems: a) supplying DC receiver, c) supplying DC and AC receivers

System fotowoltaiczny współpracujący z siecią (rys.2. a i b) nie wymaga źródła buforowego-systemu magazynowania energii. Ciągłość dostaw energii zapewnia stałe podłączenie do sieci publicznej i ewentualne braki energii są przez nią uzupełniane. Dzięki takiej konfiguracji możliwa jest również praca w nocy, kiedy energia produkowana przez GPV jest równa zero.

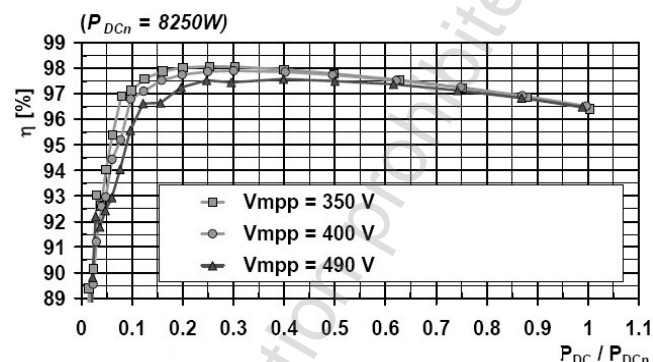
W słoneczne dni niewykorzystana energia, bądź jej nadwyżka może być sprzedawana do sieci. Zakłady energetyczne mają obowiązek zakupu „zielonej energii” wyprodukowanej w źródłach energii odnawialnej. Inwestor otrzymuje zapłatę nie tylko za samą energię, ale i za certyfikaty jej pochodzenia, co jest niewątpliwym argumentem przemawiającym za instalacją systemu fotowoltaicznego [18].

Ze względu na wysoki koszt instalacyjny GPV, konieczne jest zapewnienie pracy systemu z możliwie maksymalną wydajnością w różnych warunkach napromienienia i temperatury ogniw. Warunek ten będzie spełniony przy pracy generatora w pobliżu punktów mocy maksymalnej na charakterystyce napięcia w funkcji prądu (U-I), za co odpowiedzialne są układy MPP Trackers (MPPT). Prawidłowo działający układ maksymalizacji powinien charakteryzować się niskim kosztem, małym poborem mocy, stabilnością pracy, odpornością na zakłócenia i dużą dynamiką pracy przy niejednorodnych warunkach środowiskowych [2].

2. Sprawność inwerterów w systemach fotowoltaicznych

Omawiając blok konwersji energii prądu stałego na energię prądu przemiennego nie można pominąć kwestii sprawności bardzo ważnej w systemach fotowoltaicznych. Sprawność falownika jest zazwyczaj podawana dla jego zaprojektowanej mocy pracy, ale zwykle, przez większość czasu, falowniki

w systemach fotowoltaicznych pracują przy niepełnym obciążeniu. Duże sprawności przy niepełnym obciążeniu są szczególnie ważne w podłączonych do sieci falownikach pracujących w klimacie środkowoeuropejskim, gdzie roczna średnia moc wyjściowa GPV może być tak mała jak 10 % mocy szczytowej [7].



Rys. 3. Charakterystyki sprawności beztransformatorowego inwertera SMC8000TL dla trzech wartości napięcia z zakresu pracy z MPPT [1] gdzie: η - sprawność konwersji energii, P_{DC} - moc generatora PV, V_{MPP} - napięcie

Fig. 3. Characteristics of transformer less inverter efficiency SMC8000TL for three values of voltage in the MPPT operation [1]

Falowniki mają w sprawności przy pełnym obciążeniu od 90% do 96%, a dla 10% obciążenia - od 85% do 95%. Ponieważ straty na dopasowanie parametrów wejściowych do wyjściowych są tutaj zazwyczaj większe niż straty rezystancyjne, falowniki wykazują spadek sprawności wraz ze zmniejszaniem mocy wyjściowej i wejściowej [3].

Zastosowanie inwertera fotowoltaicznego o mocy wyjściowej 10-20% niższej niż moc maksymalna systemu jest ekonomicznie uzasadnione. Należy liczyć się z faktem, że sytuacja w której system będzie generował moc maksymalną wystąpi tylko kilka dni w roku. Zastosowanie nieco mniejszego inwertera solarnego, niż łączna moc zainstalowanych ogniw, powoduje zwiększenie sprawności w przetworzeniu energii z uwagi na fakt, iż sprawność jest tym większa im większy jest stopień wykorzystania inwertera. Przewymiarowanie inwertera podnosi koszt jego zakupu, a więc i koszt całej instalacji. Nawet w sytuacji, gdy moc dostarczona z ogniw fotowoltaicznych będzie większa niż ogólna wydajność inwertera, to nie zostanie on uszkodzony. Inwerter po prostu ograniczy produkcję do swojego najwyższego poziomu. Należy również wziąć pod uwagę fakt, iż nawet w sytuacji optymalnych warunków atmosferycznych, powierzchnia GPV może być zabrudzona, co sumarycznie ze startami rezystancyjnymi na przewodach doprowadzających prąd z panela PV może powodować kilkuprocentowy spadek mocy [4].

Sprawność inwertera η_{total} jest określana, jako iloczyn sprawności konwersji energii prądu stałego η na energię prądu przemiennego i sprawności śledzenia punktu mocy maksymalnej η_{MPPT} [11]:

$$\eta_{total} = \eta_{MPPT} \cdot \eta \quad (2.1)$$

Stosunek mocy prądu przemiennego AC, czyli mocy wyjściowej inwertera do mocy prądu stałego (moc na wejściu, moc GPV) określa sprawność konwersji energii [12]:

$$\eta = P_{AC} / P_{DC} \quad (2.2)$$

gdzie: P_{DC} - wejściowa moc prądu stałego, P_{AC} - wyjściowa moc prądu przemiennego.

3. Sprawność modułów fotowoltaicznych

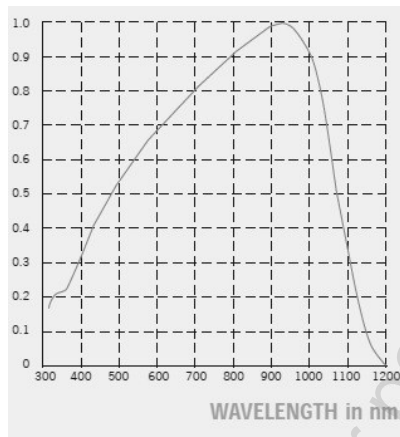
Dostępne obecnie na rynku są moduły wytwarzane z krzemu krystalicznego, krzemu amorficznego i CdTe. Moduły fotowoltaiczne są przeważnie płaskie i zawierają od 18 do 180 monokrystalicznych, polikrystalicznych lub amorficznych ogniw. Sprawności modułów komercyjnych zwiększają się z roku na rok wraz z poprawą technologii. Najbardziej zaawansowane komercyjne moduły z krzemu krystalicznego wykazują obecnie sprawności powyżej 16 %, podczas gdy przeciętne moduły zawierające krzem mono- lub polikrystaliczny mają sprawności około 11 % do 13 %. Przy produkcji masowej cienkowarstwowe moduły fotowoltaiczne są tańsze, niż moduły z krzemu krystalicznego, ale mają niższe wydajności. Większość dostępnych obecnie na rynku modułów z krzemu amorficznego ma sprawności pomiędzy 4 i 8 %. Najlepsze moduły konstruowane do zastosowań kosmicznych mają sprawności powyżej 20% i zawierają ogniwa słoneczne z arsenku galu o sprawnościach dochodzących do 30% [17].

Bariera potencjału półprzewodnika (ang. band gap) jest powodem relatywnie niskiej sprawności modułów fotowoltaicznych. Foton padający na fotoogniwo musi mieć energię na tyle wysoką, żeby wybić elektron z powłoki walencyjnej:

$$E = c \cdot h \cdot 1/\lambda \quad (3.1)$$

gdzie: h - stała Plancka, c -prędkość światła, λ - długość fali

Producenci ogniw fotowoltaicznych podając ich parametry zamieszczają charakterystyki spektrum promieniowania. Fotony o energii przewyższającej barierę potencjału nie są w pełni użyteczne, gdyż jedynie część z nich będzie wykorzystana. Poniżej podano wzór na energię fotonu potrzebną do wybitcia elektronu i wygenerowanie pary elektron-dziura w oparciu o krzywą konwersji modułu [16].



Rys. 4. Charakterystyka współczynnika konwersji energii w funkcji długości fali promieniowania słonecznego ogniwa monokrystalicznego [16]

Fig. 4. Characteristics of the energy conversion ratio as a function of the wavelength of monocrystalline solar cells [16]

Trwają badania nad zmniejszeniem ilości kosztownego półprzewodnika potrzebnego do produkcji paneli fotowoltaicznych, by zapewnić tani sposób na wydobycie większej ilości energii z wysokoenergetycznych fotonów z obszaru ultrafioletu. Efekt taki można osiągnąć stosując proste, płaskie i barwione odpowiednio tafle szkła pełniące rolę koncentratorów. Posiadają one szereg zalet w porównaniu do poprzedniej generacji koncentratorów słonecznych, czyli urządzeń, które zbierają światło słoneczne na dużym obszarze i skupiają je na ogniwie. Mogą być wykorzystywane jako okna podłączone do ogniw słonecznych. Zamiast korzystać z optyki, arkusze szklane skupiają światło za pomocą specjalnie zaprojektowanej kombinacji organicznych barwników. Światło jest absorbowane przez powłoki na jednej stronie arkusza szkła, następnie barwniki

emitują światło. Tworzą się pewnego rodzaju kanały transportujące światło do krawędzi szkła, w taki sam sposób, jak to robią światłowody. Wąskie ogniwa słoneczne laminowane do krawędzi szyby mogą przekształcać w energię fotony skupione na małej powierzchni. Takie rozwiązanie pozwala na zwiększenie sprawności ogniw do 50%, co jest zadowalającą wartością [17].



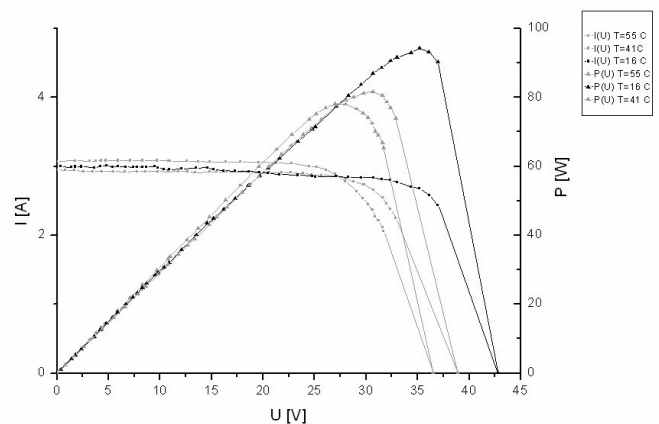
Fot. 1. Kolorowe koncentratory promieniowania słonecznego[17]

Fot. 1. Colorful solar concentrators [17]

Absorpcja promieniowania słonecznego powoduje znaczny wzrost temperatury krzemowych ogniw fotowoltaicznych w wyniku następujących procesów [7]:

- 1) nieaktywnej absorpcji fotonów (niegenerujących par elektron-dziura),
- 2) rekombinacji nośników ładunku poza obszarem złącza p-n,
- 3) ciepła Joule'a-Lenza, wydzielanego na rezystancji szeregowej.

Wraz ze zmianą temperatury ulegają zmianie właściwości fizyczne materiału półprzewodnikowego (krzemu), z którego ogniwo jest wykonane: współczynnik absorpcji promieniowania, ruchliwość ładunków, szerokość przerwy energetycznej, koncentracja samoistna nośników ładunku, rezystywność półprzewodnika. Stąd pośrednio ulegają zmianie odpowiednie parametry elektryczne ogniw i modułów PV: napięcie otwartego obwodu, prąd zwarcia, moc maksymalna, współczynnik wypełnienia charakterystyki, a co za tym idzie - sprawność konwersji fotowoltaicznej. Wzrost temperatury modułu w wyniku nasłonecznienia oraz obciążenia prądowego o 71% powoduje spadek sprawności o 26% [6].



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe i krzywe mocy dla modułu badanego w układzie PVT w trzech temperaturach przy stałym natężeniu promieniowania $E = 715 \text{ W/m}^2$ [10]

Fig. 5. Current-voltage characteristics and power curves of tested PVT module in three temperatures conditions with constant intensity of the radiation $E = 715 \text{ W/m}^2$ [10]

Na rys. 5. przedstawiono wpływ temperatury na charakterystyki modułu fotowoltaicznego przy stałej wartości natężenia promieniowania słonecznego. Jak widać rosnąca temperatura powoduje przesunięcie punktu MPP na charakterystyce i w efekcie zmniejszenie mocy uzyskanej z fotoogniw. Ten niekorzystny efekt jest obserwowany w całym zakresie natężenia promieniowania słonecznego, a jego wyeliminowanie mogłoby podnieść sprawność konwersji promieniowania nawet o kilkadziesiąt procent.

Jak już wspomniano tylko wąski zakres promieniowania słonecznego może generować energię elektryczną z zadowalającą skutecznością. Fotony spoza tego obszaru padające na moduł fotowoltaiczny powodują znaczny wzrost jego temperatury. Związane jest to z absorpcją promieniowania przez poszczególne warstwy ogniwa. Ciepło wytworzone nie musi być tylko efektem ubocznym powodującym pogorszenie właściwości modułów PV. Trwają badania nad zastosowaniem technologii wykorzystującej energię słoneczną zarówno do produkcji energii elektrycznej, jak i ogrzewania chociażby wody użytkowej za pomocą jednego modułu (PV Thermal) [5].

Spośród rodzajów PVT na największe szanse rozwoju mogą liczyć moduły cieczowe i powietrzne. Zasada działania kolektorów cieczowych polega na generowaniu energii elektrycznej i ciepłej z fotoogniw połączonych z nagrzewającymi się rurkami, przez które przepływa ciecz. W kolektorach powietrznych wykorzystywane jest ciepło powietrza przepływającego pod absorberem, gdzie zewnętrzną powłoką jest moduł fotowoltaiczny. O ile zaletą jest fakt, że można do tego rozwiązania łatwo zaadoptować standardowy panel fotowoltaiczny, to zastosowanie gorącego powietrza latem, kiedy ciepła jest najwięcej jest już znacznie ograniczone. Użycie gorącego powietrza do ogrzewania wymiennika ciepła wiązałyby się ze znacznymi stratami energii, a skuteczność chłodzenia ogniwa fotowoltaicznych byłaby bardzo niska [9].

4. Wnioski

Niewątpliwie sprawność systemu fotowoltaicznego jest bardzo ważnym parametrem świadczącym o efektywności pozyskiwania energii. Wciąż wysoka cena poszczególnych elementów systemów i coraz większe moce instalowane sprawiają, że trwają zaawansowane prace nad poprawą sprawności i obniżeniem kosztów systemów, które stają się powoli konkurencją dla energii konwencjonalnej. Elementem systemu o najniższej sprawności jest panel fotowoltaiczny.

Dobór generatora do obciążenia jest oczywiście bardzo istotny dla zmniejszenia kosztów systemu, jego eksploatacji i podwyższenia efektywności pozyskiwania energii. Działanie to jednak nie jest wystarczające, ponieważ w praktycznym użytkowaniu nie posiadamy odbiorników energii, których charakterystyka wejściowa pokrywałaby się z charakterystyką GPV w MPP w całym zakresie zmian natężenia promieniowania i temperatury ogniwa [11].

Układy MPPT śledząc punkt mocy maksymalnej pracy generatora pozwalają w bardzo wysokim stopniu wykorzystywać jego moc przy zmieniających się warunkach atmosferycznych, a sprawność śledzenia dochodząca do 95% jest wartością stałą związaną z dokładnością układów regulacji i zadowalającą [11]. Sposoby poprawienia sprawności modułów:

- 1) warstwa antyrefleksyjna (ARC - antireflective coating) na powierzchnię ogniwa. Wysoka jakość warstwy antyrefleksyjnej jest w stanie podwyższyć sprawność ogniwa nawet o 30 % [6],
- 2) warstwy skupiające (koncentratory),
- 3) ogniwo o kilku złączach absorbujących fotony bardzo efektywnie z wąskiego pasma,
- 4) aktywne chłodzenie – moduły PVT.

Do niewątpliwych zalet technologii PVT należy zaliczyć zmniejszenie powierzchni i niższy koszt instalacji oraz użycie ciepła dotychczas stanowiącego element uboczny. Rozwiązanie takie wydaje się być najtańszą alternatywą pozwalającą na wyeliminowanie negatywnego wpływu temperatury na dość kosztowne moduły fotowoltaiczne, a przez to na sprawność konwersji energii.

Należy się skupić nad możliwościami uzyskania jak największej ilości energii nie tylko elektrycznej ale i ciepłej przez zastosowanie powłok o lepszym skupieniu i absorpcji promieniowania [13].

Istotna jest również powierzchnia odbierająca energię ciepłą, jakoś przewodnika ciepła i sposób jego rozprowadzenia. Nie można przy tym zapomnieć o zabezpieczeniu całego modułu PVT przez przegrzaniem w razie braku czynnika chłodzącego

Zastosowanie dodatkowych powłok absorpcyjnych pozwoliłoby na lepsze wykorzystanie energii ciepłej. Istotne jednak jest zabezpieczenie modułu PV przed temperaturami, które znacznie skracająby jego żywotność i mogłyby przyczynić się do trwałego uszkodzenia [8].

Literatura

- [1] Haeberlin H., Borgna L., Kaempfer M., Zwahlen U., "Overview over Test Results and Measured Values of Total Efficiency", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, September 2006
- [2] Niechaj M.: Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w fotowoltaicznym systemie napędowym. Zeszyty Problenowe BOBRME Maszyny elektryczne nr 77/2007
- [3] Kolano J., "Systemy fotowoltaiczne zasilające elektryczne układy napędowe" Monografia habilitacyjna, PAN, Komitet Elektrotechniki, Lublin 2002
- [4] Perski A., "Instalacje fotowoltaiczne", Elektroinstalator nr 3, s.50-53, 2005
- [5] Pihl E., Thapper C., "Evaluation of the concentrating PVT systems MaReCo and Solar8" Division of Energy and Building Design. Lunds Institute of Technology, Lund 2006.
- [6] Radziemska E., Ostrowski P., Polek-Pasternak K., "Badania rozkładu temperatury na powierzchni oświetlonego i obciążonego modułu fotowoltaicznego", Proceedings of EC Opole 2008, Vol.2/2, pp. 461-466
- [7] Radziemska E.: "Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review", *Progr. Energy Combust. Sci.*, 2003, 29, pp. 407-424
- [8] Santbergen, R., Zolingen, R.J.C., "Modeling the thermal absorption factor of photovoltaic/thermal combi-panels", Grenoble, France april 2005.
- [9] Coventry, J.S. (2005), Performance of a concentrating photovoltaic/thermal collector, *SE 78*, pp. 211-222.
- [10] Swatowska B., "Struktury cienkowarstwowe na bazie krzemu do zastosowań w ogniwach krzemowych", Rozprawa Doktorska, AGH Katedra Elektroniki, Kraków 2006
- [11] Tumbelaka H.H., Miyatake M., "A grid current-controlled inverter with particle swarm optimization MPPT for PV generators", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 67, 2010
- [12] Tunia H., Winiarski B. *Energoelektronika – WNT*, 1994
- [13] Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A. (2002) The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* 72, pp 113-128

Witryny internetowe:

- [14] www.greenworld.serwus.pl - serwis zajmujący się ekologicznymi aspektami pozyskania energii
- [15] www.pv.pl - serwis poświęcony fotowoltaice
- [16] www.solaris18.blogspot.com - blog poświęcony odnawialnym źródłom energii i tematom pokrewnym
- [17] www.technologyreview.com - strona poświęcona innowacyjnym technologiom
- [18] www.ure.gov.pl - strona Urzędu Regulacji Energetyki

Mgr inż. Rafał Kwiecień

e-mail: kwiecień.rafał@yahoo.com

Jest absolwentem Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych), w 2011r. ukończył studia podyplomowe przy Katedrze Automatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie jest słuchaczem na II roku studiów doktoranckich przy Politechnice Lubelskiej.

