

Radosław SZCZERBOWSKI*

ANALIZA ENERGETYCZNA I EKONOMICZNA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA FOTOWOLTAIKI W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH

Polityka energetyczna Polski musi w wyważony sposób zapewnić bezpieczeństwo dostaw energii, zwiększyć wykorzystanie własnych zasobów a także promować zrównoważony rozwój różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Założone cele polityki klimatycznej i energetycznej trudno będzie zrealizować bez udziału efektywnych technologii opartych na generacji rozproszonej. W tym kontekście coraz większego znaczenia nabiera rozwój i wykorzystanie systemów fotowoltaicznych. Fotowoltaika jest jedną z bardziej obiecujących technologii, a możliwości jej stosowania w systemach energetycznych różnych skali sprawiają, że w przyszłości może ona stać się efektywnym i bezpiecznym źródłem energii oraz ważnym elementem stabilnego i niezależnego mixu energetycznego.

1. WPROWADZENIE

Polska zobowiązana jest do zwiększenia do 2020 r. udziału energii ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym do 15%. Osiągnięcie tego celu wymaga zwiększenia liczby przedsięwzięć w tym sektorze energetyki. W tym kontekście rozwój inwestycji z zakresu fotowoltaiki wydaje się być celowym. Aby ten cel był możliwy do zrealizowania, konieczne są sprzyjające rozwiązania prawne.

Ustawa o odnawialnych źródłach energii, której założenia zostały po raz pierwszy zaprezentowane przez Ministerstwo Gospodarki w 2011r., rozbudziła ogromne nadzieje wśród wytwórców energii opartej na odnawialnych źródłach. W jednej z wersji ustawy zaproponowano po raz pierwszy w Polsce wprowadzenie taryf typu Feed-In Tariff (FiT) na energię elektryczną. Ten system wsparcia został skierowany do inwestujących w mikro i małe instalacje OZE. Wprowadzenie takiego systemu wsparcia oznacza ustalenie na ustalony czas ceny urzędowej na energię elektryczną odbieraną od producenta energii z OZE. System wsparcia typu FiT jest rozpowszechniony na świecie, stosuje go ponad 50 krajów i jest to dominujący systemem wsparcia w krajach Unii Europejskiej. Dotychczas istniejący system świadectw pochodzenia nie wpłynął znacząco na rozwój rynku mikroinstalacji OZE [2, 5].

* Politechnika Poznańska.

2. PODSTAWOWE PARAMETRY OGNIW

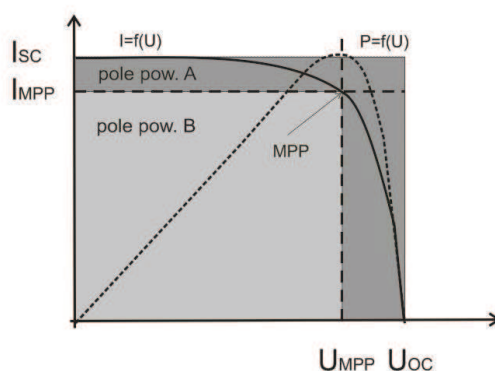
Zamiana energii słonecznej na energię elektryczną, w sposób bezpośredni, odbywa się za pomocą ogniwa fotowoltaicznego. Jest to urządzenie półprzewodnikowe zawierające w swej strukturze złącze p-n. W chwili obecnej dostępnych jest na rynku już kilka kolejnych generacji ogniw fotowoltaicznych. Ogniwa fotowoltaiczne I generacji oparte o krzemowe złącze typu p-n charakteryzują się sprawnością rzędu 17-22% ale także stosunkowo wysokimi kosztami produkcji. Są to najczęściej stosowane typy ogniw, wśród nich są ogniwa monokrystaliczne (sprawność ok. 18-22%), ogniwa polikrystaliczne (sprawność 14-18%) oraz ogniwa amorficzne (sprawność 6-10%). Ogniwa fotowoltaiczne II generacji ze złączem typu p-n zbudowane w oparciu o takie materiały jak: gal, tellurek kadmu (CdTe), mieszanina miedzi, indu, selenu (CIGS) czy krzem amorficzny. Są znacznie tańsze w produkcji ale charakteryzują się niższą sprawnością w stosunku do ogniw I generacji. Najczęściej spotykane ogniwa II generacji to ogniwa CdTe wykonane z tellurku kadmu (sprawność ok. 10-12%) ogniwa CIGS wykonane z mieszaniny półprzewodników np. miedz, ind, gal, selen (sprawność ok. 12-14%). Ogniwa fotowoltaiczne III generacji pozbawione są złącza p-n. Do tej grupy zalicza się różne zaawansowane technologie, np. ogniwa organiczne z wykorzystaniem polimerów.

Niezależnie od rodzaju i technologii wytwarzania, każdy moduł fotowoltaiczny można scharakteryzować kilkoma parametrami, które dostarczają informacji o ich jakości. Parametry te to między innymi: napięcie ogniwa rozwartego, prąd zwarcia, rezystancja szeregową, punkt mocy maksymalnej, współczynnik wypełnienia, sprawność. Pod wpływem padania promieniowania słonecznego na ogniwo, na jego rozwartych zaciskach powstaje napięcie ogniwa rozwartego U_{OC} (ang. open circuit voltage), inaczej nazywane napięciem jałowym (prąd jest równy zero). Dołączenie obciążenia (rezystancji szeregowej) R_S do tych zacisków, spowoduje zamknięcie obwodu, przepływ prądu, zależny od R_S . Najwyższa wartość prądu, przy $R_S = 0$, nazywana jest prądem zwarcia I_{SC} (ang. short circuit current). Powyższe parametry zaznaczono na charakterystyce prądowo-napięciowej (rys. 1). Kolejnym istotnym parametrem jest punkt mocy maksymalnej MPP (ang. maximum power point), można go zdefiniować jako prostokąt o maksymalnym polu powierzchni, oparty na osiach współrzędnych i wierzchołku należącym do charakterystyki, którego wierzchołek określa moc maksymalną, znamionową ogniwa P_{MPP} . Napięcie U_{MPP} i prąd I_{MPP} dla punktu mocy maksymalnej stanowią parametry znamionowe ogniwa. Punkt MPP można również określić na podstawie charakterystyki obciążenia (rys. 1), inaczej zwanej mocową. Ważną wielkość stanowi współczynnik wypełnienia, FF (ang. fill factor), nazywany także współczynnikiem wykorzystania ogniwa. Osiąga on wartość równą 1, kiedy krzywa prądowo-napięciowa jest prostokątem o bokach U_{OC} i I_{SC} . Sytuacja taka

opisuje warunki idealne. Współczynnik wypełnienia można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$FF = \frac{\text{pole powierzchni B}}{\text{pole powierzchni A}} = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} I_{SC}} = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_{OC} I_{SC}} \quad (1)$$

gdzie: P_{MPP} moc maksymalna (znamionowa) ogniwa, U_{OC} napięcie ogniwa rozwartego, I_{SC} prąd zwarcia, U_{MPP} i I_{MPP} napięcie i prąd w punkcie maksymalnej mocy.



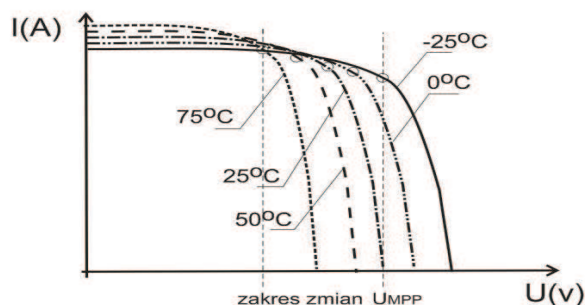
Rys. 1. Charakterystyka prądowo-napięciowa i charakterystyka obciążenia (mocowa)

Sprawność ogniwa (modułu) wyraża stosunek wytworzonej mocy elektrycznej, P_{MPP} do mocy padającego promieniowania świetlnego, P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{E \cdot s} \quad (2)$$

gdzie: E - natężenie promieniowania [W/m^2], s - powierzchnia badanego modułu [m^2].

Istotnym parametrem, który wpływa na uzysk energii elektrycznej jest temperatura pracy ogniwa. Producenci podają dane znamionowe zazwyczaj dla temperatury $25^{\circ}C$ oraz gęstości promieniowania $1000 W/m^2$. Dla temperatury powyżej $25^{\circ}C$, każdy przyrost temperatury ogniwa powoduje spadek mocy maksymalnej, zaś dla temperatury poniżej $25^{\circ}C$, każdy spadek temperatury ogniwa powoduje wzrost mocy maksymalnej (rys. 2). Biorąc pod uwagę negatywny wpływ wzrostu temperatury ogniwa na sprawność, należy zapewnić odpowiednie chłodzenie, wentylację dla modułów. Zadanie to realizowane przez odpowiedni montaż modułów, zapewniający swobodny przepływ powietrza przy instalacji [1, 3, 4].

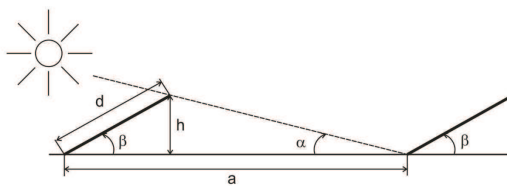


Rys. 2. Wpływ temperatury ogniwa na jego sprawność

3. WYBRANE ELEMENTY PROJEKTOWANIA ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNYCH

Ważnym aspektem podczas projektowania układów fotowoltaicznych jest ustawienie modułów w kierunku promieniowania słonecznego. W zależności od położenia geograficznego konieczny jest odpowiedni wybór optymalnego kąta nachylenia modułów względem powierzchni (kąt α) oraz ustawienie w kierunku południowym. Moduł fotowoltaiczny odbiera największą ilość energii, gdy promienie słoneczne padają prostopadłe do jego płaszczyzny. Nieznaczne odchylenie modułu od kierunku południowego (kąt β) ma niewielki wpływ na efektywność pracy instalacji jednak wiąże się ze zmniejszeniem uzysków energetycznych.

Optymalną odległość pomiędzy modułami można wyznaczyć na podstawie zależności (rys. 3):



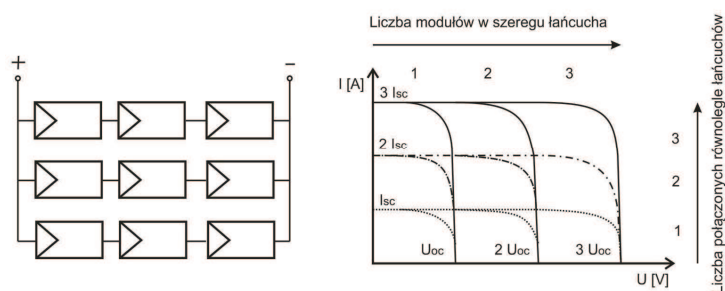
Rys. 3. Dobór odstępów między rzędami modułów fotowoltaicznych

$$a = d(\cos \beta + \sin \beta \cos \alpha) \quad (3)$$

gdzie: a - odległość między początkami następnych rzędów modułów, h - wysokość krawędzi modułu od ziemi, d - długość modułu, α - kąt padania promieni słonecznych, β - kąt nachylenia modułu do powierzchni.

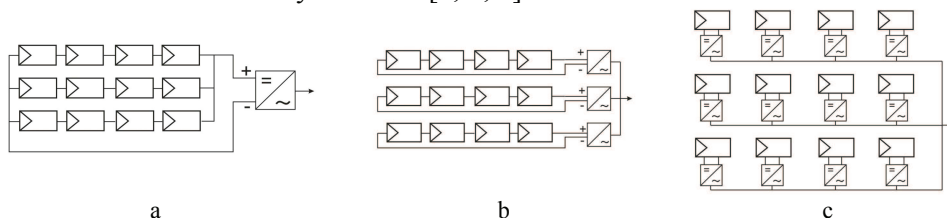
Możliwe są dwa podstawowe sposoby łączenia modułów, szeregowo i równoległe. Połączenie szeregowe powoduje wzrost napięcia proporcjonalnie do

ilości modułów, np. dla trzech modułów trzykrotnie (rys. 4). Należy zwrócić uwagę, że łączone moduły, które tworzą łańcuch muszą posiadać te same parametry, przede wszystkim te sam typ oraz prądy. Degradacja prądowa jednego z elementów będzie miała wpływ na cały łańcuch. Połączenie równoległe powoduje wzrost prądu proporcjonalnie do ilości modułów.



Rys. 4. Połączenie szeregowo-równoległe ogniw (modułów) fotowoltaicznych

Łączenie równoległe kilku łańcuchów szeregowych możliwe jest wyłącznie dla identycznej liczby modułów w szeregu. Moduł fotowoltaiczny dostarcza prąd stały, stąd konieczne jest wykorzystanie falownika. Charakteryzuje go kilka parametrów: moc, zakres napięć pracy, napięcie startu, minimalne napięcie wejściowe, maksymalne napięcie wejściowe, maksymalne napięcie pracy (w punkcie MPP), ilość wejść mocy (trackerów MPP). Można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje włączenia falowników (rys. 5): centralny, szeregowy (stringowy) oraz mikroinwerter wbudowany w moduł [1, 3, 4].



Rys. 5. Rodzaje falowników: a) centralny, b) szeregowy, c) falownik-mikroinwerter wbudowany w moduł

4. MODELOWANIE UKŁADÓW ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNYCH

Modelowanie symulacyjne jest coraz bardziej popularną metodą oceny poprawy wydajności procesów, a także pozwala na wstępne optymalizowanie parametrów układów energetycznych tak aby uzyskać maksymalną sprawność. Stale rosnąca na rynku liczba produktów oprogramowania komputerowego służącego do symulacji i różnego rodzaju analiz sprawia, że możliwości badań

symulacyjnych są bardzo szerokie. Planowanie systemu fotowoltaicznego jest złożonym procesem, w którym wiele różnych czynników musi być brane pod uwagę, takich jak dobór typu modułu, kąta i nachylenia modułów, poziom napromieniowania, wybór najbardziej odpowiedniego falownika, itp. Poza komercyjnym oprogramowaniem, w ostatnich latach powstały również interesujące darmowe programy pozwalające na projektowanie systemu fotowoltaicznych. Wśród nich można wymienić takie jak: RETScreen, Lynx Planner, SMA Sunny Design.

Program RETScreen jest narzędziem umożliwiającym podejmowanie decyzji w zakresie gospodarowania czystą energią. Jest to bezpłatne oprogramowanie udostępniane przez Rząd Kanady. RETScreen umożliwia dokonywanie oceny potencjalnych projektów energetycznych w zakresie energii odnawialnej, efektywności energetycznej czy też układów kogeneracyjnych. Z narzędziami analitycznymi w programie RETScreen zintegrowane są w pełni bazy danych dotyczących produktów, projektów, a także bazy danych hydrologicznych i klimatycznych [7].

Program SunnyDesign jest oprogramowaniem do planowania i projektowania elektrowni fotowoltaicznych. Sunny Design umożliwia zaprojektowanie instalacji, wspomagając proces doboru urządzeń dla instalacji PV [9].

Program Lynx Planner firmy Danfoss to kolejne narzędzie wspomagające proces projektowania instalacji PV. Oprogramowanie to posiada przyjazny dla użytkownika interfejs, który przy wprowadzeniu minimalnej ilości danych pozwala przeprowadzić analizę i zaprezentować optymalny system fotowoltaiczny [8].

Ciekawym rozwiązaniem dla wstępnych analiz układów fotowoltaicznych jest program PV PHIL. Jest to darmowe oprogramowanie, które jest dostępne bezpośrednio na stronie internetowej producenta, z którego można korzystać bez konieczności instalacji programu [6].

5. ANALIZA ENERGETYCZNA I EKONOMICZNA ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNEJ

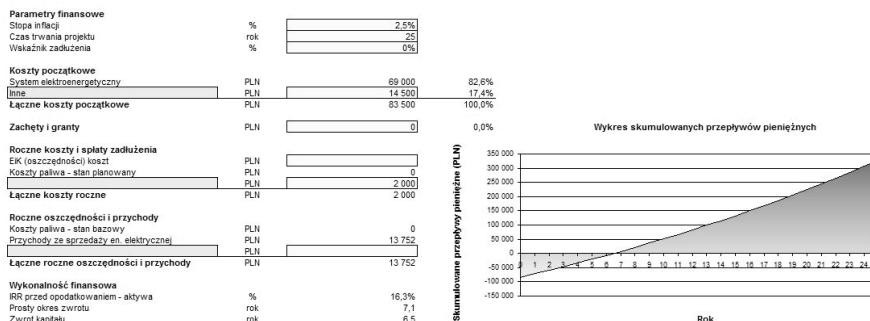
W celu porównania możliwości oprogramowania przeanalizowano projekt elektrowni fotowoltaicznej o mocy ok. 10 kW, zamontowanej na dachu domu (Tabela 1). Łączny koszt inwestycji został określony na poziomie 83500zł. Zakłada się że koszt zakupu paneli PV, inwerterów, konstrukcji montażowej oraz okablowania wynosi ok. 80 % całkowitych nakładów inwestycyjnych. Przygotowanie inwestycji to ok. 3% kosztów, montaż stanowi prawie 12% kosztów, a roczny koszt eksploatacyjny to ok. 2%.

Dzięki analizie w programie RETScreen można ocenić aspekt ekonomiczny proponowanej inwestycji. Na podstawie założonych parametrów kosztów oraz cen

energii z uwzględnieniem możliwości korzystania z taryf typu Feed In Terrif (1,3 zł/MW) czas zwrotu poniesionej inwestycji wynosi 7,1 lat (rys. 6).

Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów uzyskanych w poszczególnych programach

Program Parametr	Sunny Design	Lynx Planner	PV Phill	RETScreen
Ilość modułów	42	44	40	40
Moc [MWp]	9,66	10,1	9,2	9,66
Roczny uzysk energii [kWh]	9185,4	9488	8919	10680
Współczynnik wydajności [%]	83	81,9	-	-
Uzysk energii [kWh/kWp]	951	938	969	-
Inne możliwości programu	Dobór przekroju przewodów. Wybór lokalizacji i parametry meteo.	Wybór lokalizacji i parametry meteo.	Wybór lokalizacji z Google maps. Analiza finansowa.	Analiza finansowa.



Rys. 6. Parametry finansowe otrzymane w programie Retscreen

5. WNIOSKI

Mimo, że możliwości rozwoju rynku fotowoltaicznego w Polsce są ograniczone, to jednak celowym jest zwrócenie uwagi na możliwości wykorzystania energii słonecznej w aspekcie bezpośrednich korzyści. Są to korzyści ekologiczne, ekonomiczne i społeczne. Polska zobowiązana jest do ograniczania emisji CO₂ do atmosfery, więc zwiększanie udziału energii odnawialnych w strukturze energii pierwotnej, bezpośrednio przyczyni się do obniżenia emisji.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można zauważyć, że podstawowe parametry obliczeń uzyskiwane z kilku programów nie różnią się znacznie od siebie. A wykorzystanie ogólnodostępnych programów pozwala zaprojektować system fotowoltaiczny. Niestety gdyby nie korzystna stawka Feed-In Tariff za cenę energii okres zwrotu takiej inwestycji byłby dłuższy od założonego czasu życia modułów fotowoltaicznych.

Mimo, że fotowoltaika jeszcze bardzo długo nie będzie stanowiła konkurencji dla energetyki opartej o surowce kopalne, to jej udział powinien sukcesywnie wzrastać, doprowadzając w przyszłości do zmiany struktury produkcji energii oraz czyniąc energetykę przyjazną dla człowieka i środowiska naturalnego.

LITERATURA

- [1] Klugmann-Radziemska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010.
- [2] Krawiec F., Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego, Difin, Warszawa 2010.
- [3] Stapleton G., Neill S., Grid-Connected Solar Electric Systems, Earthscan, London 2012.
- [4] Haberlin H., Photovoltaics. System Design and Practice, Wiley, 2012.
- [5] Wiśniewski G. (red.), Analiza możliwości wprowadzania systemu feed in tariff dla mikro i małych instalacji OZE, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa, 2012.
- [6] www.pv-phil.com
- [7] Program RETScreen International.
- [8] Program Lynx Planner.
- [9] Program SMA Sunny Design.

ENERGY AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE USE OF PHOTOVOLTAIC IN ENERGY SYSTEMS

Polish energy policy must ensure the safety of energy supply and increase the use of their own resources. It's also important to promote the development of various electricity generation technologies. The objectives of climate and energy policy will be difficult to achieve without effective technologies based on distributed generation. In this context, it's essential to the development and use of photovoltaic systems. Photovoltaic is one of the most promising technologies. The possibility of using the PV energy systems of different scale make that in the future PV become an effective and safe source of energy. In the long term, can be an important part of a stable and independent of the energy mix.