

Kazimierz HERLENDER

Politechnika Wrocławska, Instytut Elektroenergetyki

Efektywność Energetyczna Badawczego Systemu Fotowoltaicznego

Streszczenie: W artykule zostanie przedstawiona efektywność energetyczna badawczego systemu fotowoltaicznego, który został zainstalowany na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Perspektywa znaczącego rozwoju tego typu źródeł energii elektrycznej wymaga prowadzenia prac pozwalających na efektywne i bezpieczne ich stosowanie w systemie elektroenergetycznym.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, system fotowoltaiczny, efektywność energetyczna

Wprowadzenie

Obecnie w Polsce zainstalowanych jest ok. 3,6 MW mocy elektrycznej w elektrowniach fotowoltaicznych, z czego 9 elektrowni (łącznie 1,7 MW) przyłączone jest do sieci energetycznej. Pozostała część instalacji fotowoltaicznych używana jest do wytwarzania energii elektrycznej na potrzeby własne gospodarstw, firm i instytucji, gdzie zostały zainstalowane.

Ze względu na znaczne koszty instalacji fotowoltaicznych ich rozwój ściśle związany jest z obowiązującymi przepisami prawnymi. Sytuację na rynku polskim w tym zakresie ma uregulować ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii, która wciąż jest w przygotowaniu. Pewne możliwości rozwoju mikro- i małych instalacji fotowoltaicznych zawarto w ustawie „Mały Trójpak Energetyczny”.

Efektywność energetyczna ma zasadnicze znaczenie dla realizacji wyznaczonych przez Unię Europejską na rok 2020 ambitnych celów w dziedzinie walki ze zmianami klimatycznymi - **Pakiet klimatyczno-energetyczny „3x20”**. Przewidują one zmniejszenie emisji dwutlenku węgla o 20% w stosunku do poziomu z 1990 roku, zmniejszenie zużycia energii pierwotnej o 20% oraz uzyskiwanie 20% energii ze źródeł odnawialnych (w Polsce 15%). Ze względu na to, że budynki w Unii Europejskiej zużywają niemal 40% energii i emitują 36% dwutlenku węgla, podjęcie działań zmierzających do poprawy ich efektywności energetycznej wydatnie przyczyni się do osiągnięcia wszystkich powyższych celów. Ponadto efektywne wykorzystanie energii pozwoli zmniejszyć zależność Unii od zagranicznych rynków energii, a tym samym zwiększyć średnio- i długoterminowe bezpieczeństwo dostaw.

Stan Prawny dotyczący Energetyki Odnawialnej

Podstawowym aktem UE w zakresie odnawialnych źródeł energii (OZE) jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. U jej podstaw leżą m.in.:

- kontrola zużycia energii w Europie,
- zwiększone stosowanie energii ze źródeł odnawialnych,
- oszczędność energii,
- zwiększona efektywność energetyczna.

W Polsce w zakresie odnawialnych źródeł energii do czasu wdrożenia Dużego Trójpaku w dalszym ciągu **Podstawowymi aktami normatywnymi regulującymi obowiązki z zakresu wykorzystania OZE w Polsce są:**

1. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne, (Dz.U. z 2006 r.Nr 89, poz. 625 z późn. zm.),
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia

- świadczeń pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii (Dz.U. Nr 156, poz. 969 z późn. zm.),
3. Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dz.U. Nr 169, poz. 1199) wraz z odpowiednimi przepisami wykonawczymi.
 4. **Ustawa Mały Trójpak Energetyczny** – obowiązuje od 11 września 2013 r.

Wnioski wynikające z analizy Ustawy Mały Trójpak [1]:

A - Informacje ogólne

- większe wsparcie dla jednostek rozproszonych - innowacyjnych i efektywnych,
- zachowanie dotychczasowych zasad wsparcia dla działających instalacji OZE,
- niezmienność zasad przez cały okres wsparcia instalacji OZE,
- wprowadzenie koncepcji „sprzedawcy z urzędu”,
- likwidacja wsparcia dla jednostek zamortyzowanych,
- ograniczenie wsparcia technologii współpalania.

B - Rozwój mikroźródeł

- zwolnienie z akcyzy energii elektrycznej wytworzonej w mikroinstalacji,
- zwolnienie z prowadzenia działalności gospodarczej,
- wprowadzenie cen gwarantowanych,
- wprowadzenie uproszczonej procedury przyłączania mikroinstalacji do sieci,
- gwarancja zakupu energii elektrycznej w cenie 80% z roku wcześniejszego,
- przyłączenie do sieci zwolnione z opłaty,
- przeniesienie kosztów instalacji układu zabezpieczającego i układu pomiarowo-rozliczeniowego na operatora systemu dystrybucyjnego,
- wprowadzono gwarancję pochodzenia
- wprowadzono wymogi dla Instalatorów mikroinstalacji i małych instalacji
- wprowadzono wymogi akredytowania organizatorów szkoleń.
- wprowadzono podział instalacji na:
 - mikroinstalacja - do 40 kW łącznej zainstalowanej mocy elektrycznej lub do 120 kW łącznej mocy cieplnej,
 - mała instalacja - 40 kW do 200 kW łącznej zainstalowanej mocy elektrycznej lub od 120 kW do 600 kW łącznej mocy cieplnej,

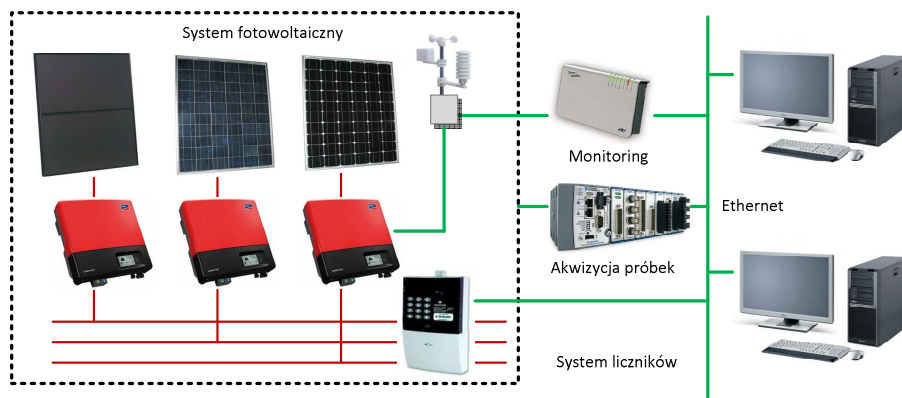
Badawczy System Fotowoltaiczny

Badawczy System Fotowoltaiczny zbudowany na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej umożliwia prowadzenie pomiarów dotyczących wytwarzania energii elektrycznej z energii słonecznej. Możliwości badawcze obejmują pomiar, gromadzenie danych pomiarowych oraz ich analizę. Analiza prowadzona jest w oparciu o systemy cyfrowego przetwarzania danych oraz inteligentne systemy licznikowe. Wyniki prowadzonych badań są przetwarzane on-line oraz udostępniane poprzez sieć komputerową.

Strukturę Badawczego Systemu Fotowoltaicznego PV PWR (BSF PV PWR) przedstawiono na rysunku 1 [2].

Zainstalowano moduły fotowoltaiczne trzech różnych typów: monokrystaliczne, polikrystaliczne i cienkowarstwowe, co pozwala na badania porównawcze uwzględniające różne warunki pogodowe. Stacje pogodowe znajdują się przy każdym bloku energetycznym i umożliwiają pomiar nasłonecznienia i temperatury otoczenia, pomiar temperatury modułu oraz pomiar wiatru. Każdy z typów modułów jest włączony poprzez osobny inwerter do sieci elektrycznej niskiego napięcia. System wyposażony jest w inteligentny pomiar licznikowy, analizę jakości energii oraz systemy monitorowania parametrów inwerterów.

VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



Rys.1. Struktura Badawczego Systemu Fotowoltaicznego PV PWR [2, 3]

Badawczy System Fotowoltaiczny PV PWR składa się z 3 typów modułów fotowoltaicznych: monokrystalicznych, polikrystalicznych i cienkowarstwowych CIGS o łącznej mocy 15,21 kW. Zostały one połączone szeregowo-równolegle tworząc 3 bloki energetyczne.

Pierwszy blok składa się z 27 modułów typu monokrystalicznego o znamionowej mocy 190 Wp każdy. Całkowita moc wynosi 5,13 kWp. Katalogowa sprawność tych paneli wynosi ok. 14,9 %.

Drugi blok energetyczny składa się z 21 sztuk polikrystalicznych modułów fotowoltaicznych o mocy znamionowej równej 240 Wp każdy. Sumaryczna moc wynosi 5,04 kWp. Katalogowa sprawność tych paneli wynosi ok. 15,5 %.

Trzeci blok energetyczny systemu PV PWR zbudowany jest z modułów cienkowarstwowych typu CIGS. Składa się z 56 modułów o znamionowej mocy 90 Wp każdy. Całkowita moc tej części to 5,03 kWp. Katalogowa sprawność tych paneli wynosi ok. 15,5 %.

Efektywność energetyczna Badawczego Systemu Fotowoltaicznego PV PWR

Dane pomiarowe systemu opisywane w referacie obejmują dokładnie rok badań w okresie od 22.11.2011r do 21.11.2012r, a tym samym dotyczą pierwszego roku działania zainstalowanej elektrowni słonecznej. Informacje odnoszące się do ilości wytworzonej energii przez część monokrystaliczną i polikrystaliczną zbierane są od pierwszego dnia po uruchomieniu systemu, a w przypadku sekcji paneli cienkowarstwowych CIGS dopiero od dnia 7.12.2012r, czyli o 15 dni krócej.

Całoroczny cykl obserwacji pozwala na określenie ilości wytworzonej energii elektrycznej w poszczególnych porach roku, a nawet w poszczególnych miesiącach i dniach. W referacie przedstawiono wybrane elementy analizy BSF PV PWR dotyczące następujących aspektów:

- energia elektryczna wytworzona w całym okresie badawczym - cały rok,
- energia elektryczna wytworzona w podziale na pory roku,
- energia elektryczna wytworzona w podziale na miesiące,
- energia elektryczna wytworzona w podziale na pojedyncze dni.

Energia elektryczna wytworzona w całym okresie badawczym

Podstawową i chyba najbardziej oczekiwaną informacją dotyczącą pracy systemu fotowoltaicznego w określonym czasie jest informacja o ilości wyprodukowanej energii elektrycznej dla całego okresu badawczego (rok kalendarzowy).

Całoroczny cykl obserwacji pozwala na określenie ilości wytworzonej energii elektrycznej w poszczególnych porach roku, a nawet w poszczególnych miesiącach i dniach.

W tabeli 1 zestawiono ilość wyprodukowanej energii elektrycznej przez BSF PV PWr sumarycznie oraz w rozbiciu na poszczególne typy ogniw (MONO-monokrystaliczne, POLI – polikrystaliczne, CIGS – cienkowarstwowe).

Tabela 1. Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej przez BSF PV PWr w okresie 22.11.2011 – 21.11.2012 sumarycznie i przez poszczególne typy ogniw

System [kWh]	MONO [kWh]	POLI [kWh]	CIGS [kWh]
15578,78	5602,41	4506,22	5470,11

Sumaryczna energia elektryczna wyprodukowana w okresie od 22.11.2011r do 21.11.2012r przez BSF PV PWr wyniosła ok. 15,6 MWh, przy czym udział poszczególnych składowych jest różny: 36% sumarycznej energii pochodzi z modułów monokrystalicznych, 35% przypada na część paneli cienkowarstwowych, a tylko 29% dla sekcji ogniw polikrystalicznych. Należy jednak pamiętać, że sekcja z panelami CIGS była uruchomiona o 15 dni później niż pozostałe dwie sekcje.

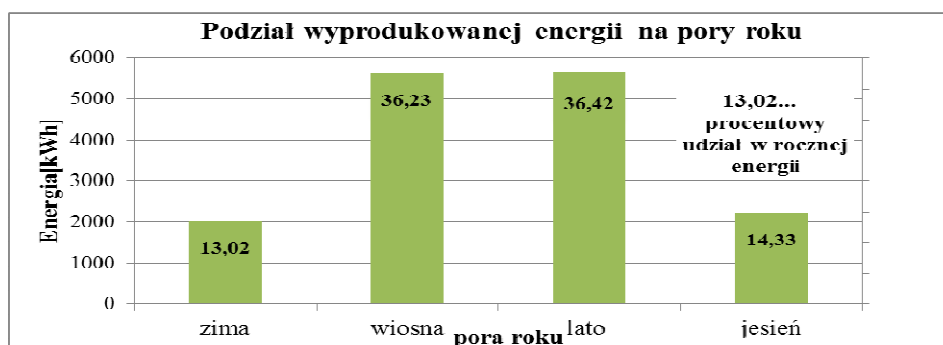
Energia elektryczna wytworzona w podziale na pory roku

Często zmienność produkcji energii elektrycznej w systemach wytwórczych podaje się w zależności od pory roku. W tabeli 2 zestawiono ilość wytworzonej energii elektrycznej przez BSF PV PWr w poszczególnych porach roku (zima, wiosna, lato, jesień) wraz z rozbiciem na poszczególne typy ogniw (MONO, POLI, CIGS)

Tabela 2. Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej przez BSF PV PWr w poszczególnych porach roku - sumarycznie i przez poszczególne typy ogniw

Pora roku	System	MONO	POLI	CIGS
Zima	2025,95	752,71	545,07	728,17
Wiosna	5639,08	1985,75	1671,14	1982,19
Lato	5668,77	1979,40	1689,53	1999,75
Jesień	2230,59	877,89	599,97	752,73

Na rysunku 2 pokazano ilość energii elektrycznej wytworzonej w BSF PV PWr w poszczególnych porach roku oraz jej procentowy udział w energii całkowitej.



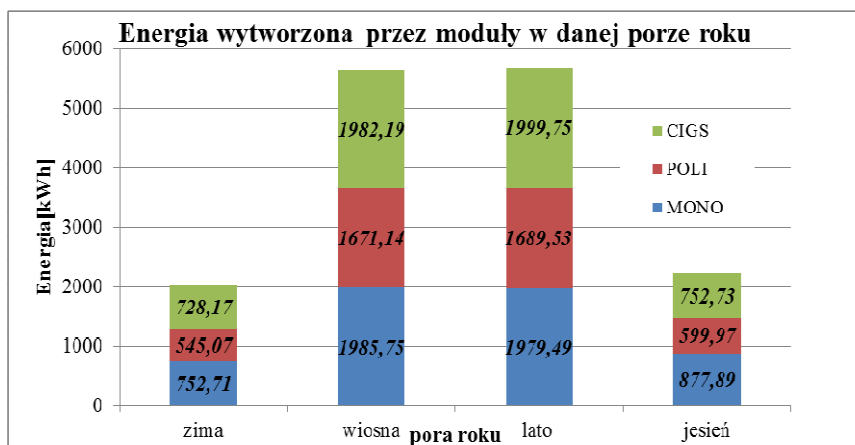
Rys. 2. Procentowy udział energii elektrycznej wytworzonej w systemie BSF PV PWr w poszczególnych porach roku

Przedstawienie wyprodukowanej energii z podziałem na pory roku pokazuje, że prawie 73% całkowitej energii zostało uzyskane w przeciągu pół roku - wiosną i latem.

VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Trzykrotnie większa produkcja energii elektrycznej wiosną i latem niż jesienią i zimą spowodowana jest większą ilością promieniowania słonecznego docierającego wtedy do systemu – dzień trwa dłużej, a górowanie słońca następuje na większej wysokości. Na wykresie (Rys.2.) można zauważyć również równomierny rozkład pozyskanej energii zarówno w przypadku pory wiosna/lato jak i jesień/zima. Biorąc pod uwagę średnią długość dnia w danej porze roku, a tym samym ilość godzin ze słońcem podczas, których możliwa jest produkcja energii to taki wynik nie jest czymś zaskakującym. Letni dzień trwa niecałe 15 godzin, a wiosną jest tylko pół godziny krótszy, w przypadku jesieni jest to już tylko 10h, a zimą nieco ponad dziewięć i pół godziny.

Na rysunku 3 przedstawiono udział energii produkowanej przez poszczególne sekcje systemu w danej porze roku. Analizując udział energii wytworzonej wiosną i latem przez cześć monokrystaliczną i cienkowarstwową widać, że ilość wytworzonej energii w obu przypadkach jest porównywalna.



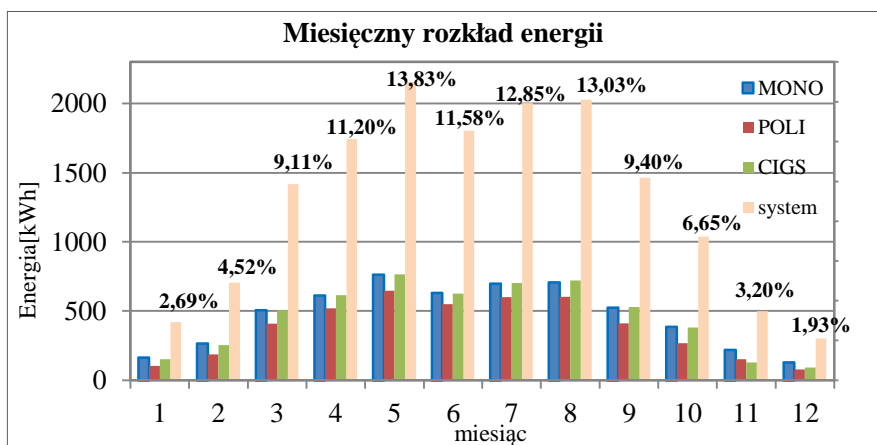
Rys. 3. Energia elektryczna wytworzona przez poszczególne typy modułów (MONO, POLI, CIGS) w BSF PV PWr w poszczególnych porach roku

Największa różnica widoczna jest podczas jesieni, gdzie panele CIGS wyprodukowały znacznie mniej energii w stosunku do sekcji monokrystalicznej. Należy jednak pamiętać, że przez 15 jesiennych dni na początku pracy systemu nie działał moduł paneli cienkowarstwowych (CiGS).

Energia elektryczna wytworzona w podziale na miesiące

Na rysunku 4. pokazano procentowy udział energii elektrycznej wytworzonej w BSF PV PWr w poszczególnych miesiącach w stosunku do sumarycznej ilości energii wytworzonej w analizowanym okresie oraz udziały poszczególnych typów ogniw (MONO, POLI, CIGS).

Generalnie obserwując rozkład energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach w skali roku zauważalna jest ponad dwukrotnie większa jej produkcja w miesiącu marcu w stosunku do lutego i w miesiącu październiku w odniesieniu do listopada. Ilość energii elektrycznej wytworzonej od listopada do lutego stanowi tylko ok.10% całkowitej jej wartości.



Rys. 5. Procentowy udział energii elektrycznej wytworzonej w BSF PV PWr w poszczególnych miesiącach w stosunku do sumarycznej energii wytworzonej w analizowanym okresie oraz udziały poszczególnych typów ogniw (MONO, POLI, CIGS)

Z rysunków 4 i 5 wynika, że w przypadku miesięcy letnich średnia zarejestrowana wartość nasłonecznienia paneli monokrystalicznych jest większa w stosunku do bloku CIGS (spowodowane to jest innym ułożeniem tych paneli na dachu budynku względem słońca), jednak ilość wytworzonej energii bloku cienkowarstwowego jest większa niż dla modułu monokrystalicznego. Świadczy to o efektywniejszym przetwarzaniu energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną przez panele CIGS w tym okresie..

Jednak w przypadku miesięcy zimowych sytuacja jest odwrotna. Nasłonecznienie większe rejestrowane jest przez moduł cienkowarstwowy, a więcej energii produkują panele monokrystaliczne.

Energia elektryczna wytworzona w podziale na pojedyncze dni

O ile przedstawienie produkcji energii elektrycznej przez system BSF PV PWr w podziale na pory roku czy nawet w podziale na miesiące wydaje się być czytelny to analizę produkcji energii elektrycznej w poszczególnych dniach, przeprowadzono stosując zasadę procentowego udziału produkcji energii elektrycznej w stosunku do dnia, w którym została wytworzona największa jej ilość z uwzględnieniem rodzaju modułów fotowoltaicznych.

Okazało się, że dla całego systemu PV PWr najbardziej efektywnym dniem był dzień 8 maja 2012 r, w którym ilość wytworzonej energii elektrycznej wynosiła 98,98 kWh. Okazało się również, że był to najlepszy dzień dla każdego z zainstalowanych typów modułów, a energia elektryczna wyprodukowana w tym dniu przez każdy z nich wynosiła odpowiednio: 34,5 kWh przez moduły monokrystaliczne, 29,27 kWh przez moduły polikrystaliczne i 35,21 przez moduły cienkowarstwowe.

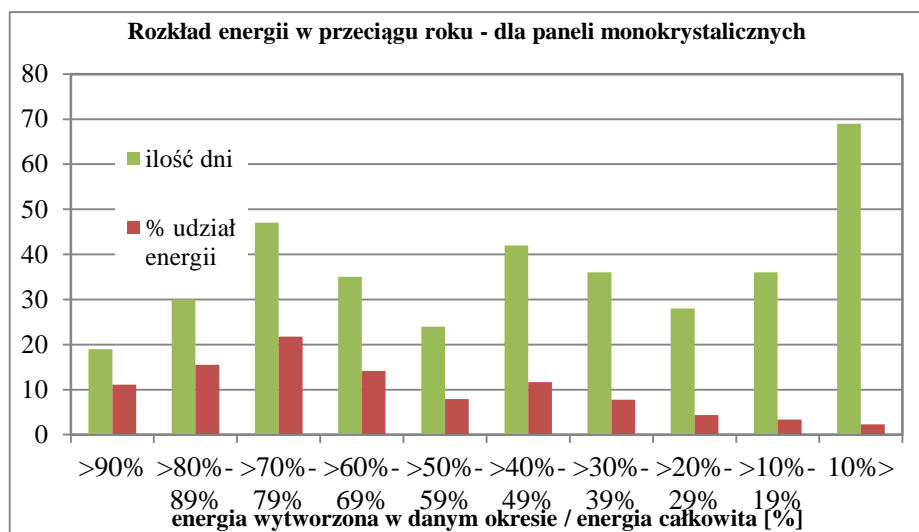
W tabeli 4 zastawiono rozkład dziennych udziałów produkcji energii elektrycznej przez moduły monokrystaliczne w stosunku do dnia, w którym uzyskano najwięcej energii elektrycznej z tych modułów. Dla przyjętych 10% przedziałów w tabeli 4 przedstawiono ilość dni, sumaryczną energię wytworzoną w tych dniach oraz jej procentowy udział w stosunku do sumarycznej energii wyprodukowanej przez moduły monokrystaliczne w całym okresie badawczym.

VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Tabela 4. Rozkład dziennych udziałów produkcji energii elektrycznej przez moduły monokrystaliczne w stosunku do maksymalnej dobowej wartości energii elektrycznej wyprodukowanej przez te moduły

Monokrystaliczne										
E_{wyt}/E_{max}	>90%	>80% - 90%	>70% - 80%	>60% - 70%	>50% - 60%	>40% - 50%	>30% - 40%	>20% - 30%	>10% - 20%	≥10 %
Ilość dni	19	30	47	35	24	42	36	28	36	69
E_{wyt}	620,9	869,6	793,8	793,8	445,2	655,10	434,91	243,90	188,1	125,3
% E_{cat}	11,10	15,54	21,78	14,18	7,96	11,71	7,77	4,36	3,36	2,24

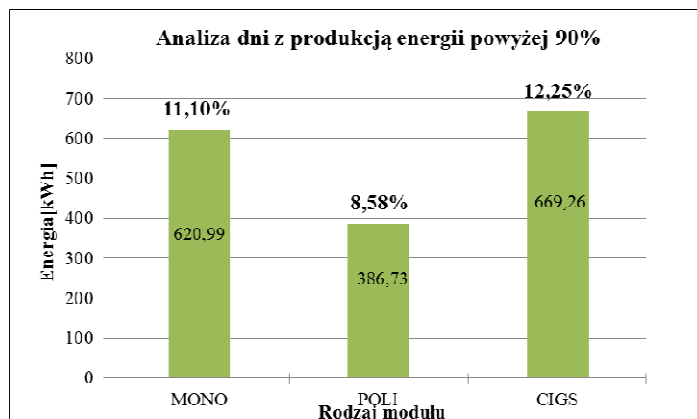
Na rysunku 5 przedstawiono interpretację graficzną danych zawartych w tabeli 4 zarówno ilość dni z określoną ilością wyprodukowanej energii jak i procentowy udział energii wyprodukowanej w tym czasie do energii sumarycznej.



Rys. 5. Graficzna prezentacja danych zawartych w tabeli 4.

W przypadku każdego z rodzaju ogniw najwięcej dni – ponad dwa miesiące, stanowią dni o efektywności mniejszej niż 10% w stosunku do maksymalnej energii wyprodukowanej przez poszczególne ogniwa jak i cały system. Ilość wytworzonej energii w tych dniach nie przekracza 3% sumarycznej energii w żadnym z modułów. Dni, w których produkcja energii jest największa było najmniej bez względu na to jakie panele zostały użyte. Jednak tylko w przypadku modułu polikrystalicznego obserwowalna jest znacznie mniejsza liczba dni w zakresie powyżej 90% w stosunku do dnia maksymalnej energii od pozostałych grup procentowych. Na dodatek jest to część systemu, która w odróżnieniu od dwóch pozostałych, posiada liczbę dni z największym udziałem wyprodukowanej energii w przedziale między 60%, a 70%. W pozostałych dwóch przypadkach dni te znajdują się w przedziale jednym wyżej między 70%, a 80% (Rys. 5). Jeżeli chodzi o ilość wytworzonej energii w tych dniach to w każdej części jest to ponad 20% w stosunku do całkowitej jej sumy. Zaskakujące jest również, że dla modułu CIGS i dla modułu monokrystalicznego jest nieomalże tak samo mało dni z produkcją sięgającą 50% - 59 % maksymalnej energii dziennej. Moduł polikrystaliczny ma bardziej równomierny rozkład ilości dni w danym przedziale procentowym.

Na rysunku 6 przedstawiono ilość energii oraz jej udział procentowy dla każdego typu modułów dla dni z produkcją energii elektrycznej powyżej 90 %.



Rys. 6. Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez różne typy paneli w dniach z największą produkcją energii elektrycznej (powyżej 90%) oraz ich udział procentowy w energii całkowitej wytworzonej w danych typach paneli.

Z danych zamieszczonych rysunku 6. wynika, że najlepiej pracowały panele cienkowarstwowe, które wytworzyły w tych dniach najwięcej energii, co stanowiło ponad 12% jej całkowitej wartości. Na ten wynik składa się tylko 20 dni. Dla paneli monokrystalicznych jest to odpowiednio 19 dni, w których uzyskano 11.10 % energii elektrycznej a dla paneli polikrystalicznych 14 dni , w których uzyskano 8,58 % energii.

Podsumowanie

System BSF PV PWr był sfinansowany przez Fundusz Nauki i Technologii Polskiej w ramach grantu rozwojowego jest elementem długoplanowego projektu mającego przyczynić się do rozwoju grupy badawczej w dotychczas mało poznanej tematyce współpracy urzędów energetyki odnawialnej z systemem elektroenergetycznym.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że produkcja energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych jest bardzo zróżnicowana zarówno jeśli weźmie się pod uwagę pory roku, poszczególne miesiące czy nawet konkretne dni. Sprawa jest oczywista, ale w referacie strano się przedstawić jak duże to są różnice na przykładzie wybranego obiektu rzeczywistego.

O tych różnicach należy szczególnie pamiętać w najbliższym czasie, gdy może się pojawić coraz więcej małych i mikroinstalacji fotowoltaicznych, które będą przyłączane do sieci elektroenergetycznej. Możliwość efektywnego wykorzystania tych instalacji będzie wymagało zainstalowania odpowiednich systemów zarządzających, które pozwolą zapewnić prawidłową pracę systemu elektroenergetycznego.

Wydaje się, że jednym ze sposobów zwiększających efektywność takich instalacji może być instalowanie systemów magazynowania energii.

Bibliografia

1. Ustawa „Mały Trójkąt energetyczny” z 11 września 2013
2. Łukasz Szumiec „Dokumentacja powykonawcza instalacji fotowoltaicznej o mocy znamionowej 3x5kW zainstalowanej na dachu oraz pomieszczenia technicznego na poddaszu budynku D1 Politechniki Wrocławskiej”, Wrocław 2011.
3. Herlender K., Rezmer J., *Badawczy system fotowoltaiczny, Przegląd elektrotechniczny*, 12A/2012

Autor: dr inż. Kazimierz Herlender; Instytut Elektroenergetyki Politechniki Wrocławskiej, wyb. St. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: kazimierz.herlender@pwr.wroc.pl