

Krzysztof Piech, Andrzej Bień, Janusz Teneta, Jarosław Kozik  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków

## KONCEPCJA STANOWISKA BADAWCZEGO Z MASZYNĄ ELEKTRYCZNĄ ZASILANĄ Z UKŁADU WYPOSAŻONEGO W MODUŁY PV

### THE CONCEPT OF TEST STAND WITH ELECTRIC MACHINE POWERED FROM A SYSTEM WITH A PV MODULES

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono koncepcję stanowiska badawczego z maszyną elektryczną zasilaną z układu wyposażonego w moduły PV. Stanowisko zakłada połączenie modułów fotowoltaicznych o łącznej mocy 2,5 – 3 kWp w specjalnie skonfigurowaną sieć. Do tego celu wykorzystane będą optyimizery mocy, które wraz z falownikiem stworzą indywidualny system pomiarowy. Na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań konstrukcyjnych zarówno dla modułów fotowoltaicznych jak i maszyn elektrycznych. Prowadzone badania będą miały na celu dobór optymalnie współpracujących ze sobą elementów systemu. Przewiduje się realizację następujących etapów prac: zestawienie kilku różnych technologicznie modułów PV w jeden system pomiarowy; podłączenie każdego modułu do optyimizera mocy i kolejno do falownika; skonstruowanie systemu pomiarowego umożliwiającego agregację danych i wgląd w pracę indywidualnych modułów poprzez stworzony w tym celu specjalny system online umożliwiający ciągły dostęp i analizę pracy; pomiar parametrów i charakterystyki pracy maszyny elektrycznej zasilanej z proponowanego układu; porównanie uzysków energetycznych z poszczególnych modułów; zestawienie danych pomiarowych pracy maszyny elektrycznej i odniesienie ich do pracy tej samej maszyny zasilanej ze standardowej sieci elektroenergetycznej; analiza uzyskanych danych.

**Abstract:** The article presents the concept of a test stand with an electric machine powered from a system equipped with PV modules. The stand assumes connecting PV modules with a total power of 2.5 - 3 kWp in a specially configured network. For this purpose, power optimizers will be used, which together with the inverter will create an individual measurement system. There are many construction solutions available on the market for both photovoltaic modules and electric machines. The conducted research will aim to select optimally cooperating elements of the system. The following stages of works are planned: combining several technologically different PV modules into one measuring system; connection of each module to the power optimizer and successively to the inverter; constructing a measurement system enabling aggregation of data with insight into the operation of individual modules with access to online system created for this purpose; measurement of parameters and characteristics of the operation of the electric machine fed from the proposed system; comparison of energy output from the individual modules; compilation of measurement data of the operation of the electric machine with comparison to the operation of the same machine supplied from the standard power grid; analysis of the obtained data.

**Słowa kluczowe:** stanowisko badawcze, maszyny elektryczne, system fotowoltaiczny, panele PV, OZE

**Keywords:** test stand, electrical machines, photovoltaic system, PV panels, renewable energy source

#### 1. Wstęp

Systemy fotowoltaiczne wykorzystujące w swej pracy efekt fotoelektryczny, dzięki któremu możliwa jest konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną, stają się obecnie coraz bardziej powszechne w zastosowaniach indywidualnych jak i komercyjnych. Naturalnym jest upowszechnianie się tej formy wytwarzania energii elektrycznej, która jest dostępna lokalnie i nie grozi jej wyczerpanie się zasobu, którym jest Słońce. W tabeli znajdującej się na kolejnej stronie (Tab. 1.) przedsta-

wiono moc osiągalną netto (w [MW]), źródeł wytwarzania energii elektrycznej w Polsce wg. zastosowanej technologii w latach 2005-2040. Dane bazują na stanie rzeczywistym (do 2015 roku włącznie) i prognozach zawartych w drugim załączniku analitycznym do „Krajowego Planu na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030” (KPEiK) opracowanym przez Ministerstwo Energii. Z poniższego zestawienia wynika iż, fotowoltaika w Polsce, w najbliższych latach będzie się mocno rozwijała [2,3].

Moc osiągalna netto źródeł wytwarzania energii elektrycznej z systemów wyposażonych w moduły fotowoltaiczne w 2015 roku w Polsce wynosiła 108 [MW], według szacunków wykonanych przez Ministerstwo Energii, w 2040 roku wyniesie ona aż 15 671 [MW], czyli będzie to największy i najbardziej dynamiczny wzrost wśród wszystkich źródeł wytwórczych dostępnych w naszym kraju. Taki stan wiąże się z koniecznością instalowania kolejnych źródeł PV, tych dużych czyli elektrowni słonecznych jak również mniejszych jednostek, dostępnych lokalnie przy gospodarstwach domowych czy zakładach pracy [5, 7, 8].

Tab. 1. Moc osiągalna netto (podana w MW) źródeł wytwarzania energii elektrycznej wg zastosowanej technologii [3]

	2005	2015	2025	2040
EL WB Stare	8 197	8 643	7 180	1 030
EL WB Nowe	0	0	448	448
EL WK Stare	14 613	13 617	11 094	1 744
EL WK Nowe	0	0	4 434	4 434
EL Gaz	0	0	536	3 561
EL Jądrowe	0	0	0	5 200
EL Wodne	1 064	964	1 039	1 289
EL Pompowe	1 256	1 405	1 405	1 405
EC Przemysłowe	6140	1 925	1 869	1 959
EC WK		4 046	3 973	3 196
EC Gaz	760	928	3 177	4 625
EL i EC Biomasa	102	553	769	1 572
EC Biogaz		216	383	621
EL Wiatr	121	4 886	7 822	11 399
<b>Fotowoltaika</b>	<b>0</b>	<b>108</b>	<b>3 567</b>	<b>15 671</b>
Turb.gaz./Zimna rez./Impor	0	0	0	4 509
<b>Razem</b>	<b>32 253</b>	<b>37 290</b>	<b>47 695</b>	<b>62 662</b>

Zwiększona ilość instalacji PV w Polsce, jak również ogólnosiwiatowy, wzrostowy trend branży fotowoltaicznej, potwierdza zasadność podejmowanych badań nad wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej z promieniowania słonecznego w celu zasilania maszyn elektrycznych [1, 9, 10]. Proponowana koncepcja stanowiska badawczego wykorzystującego powyższe założenia została zaprezentowana w niniejszym artykule.

## 2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko będzie się składać z około dziesięciu różnych modułów PV o łącznej mocy oscylującej w granicach 2500-3000 [Wp]. Instalacja modułów fotowoltaicznych odbędzie się w odpowiednim środowisku pomiarowym aby możliwym było stworzenie dedykowanej infrastruktury przepływu i agregacji informacji. Funkcjonalność ta zostanie uzyskana dzięki za-

stosowaniu optymizerów mocy dla każdego badanego modułu.

W celu analizy poszczególnych modułów PV, każdy musi być wyposażony w jeden dedykowany optymizer. Urządzenia te monitorują efektywność pracy poszczególnych paneli, dzięki ich zastosowaniu możliwym staje się pomiar parametrów elektrycznych na poziomie pojedynczego modułu. Łącząc poszczególne optyimizery, wykonalnym będzie zbudowanie infrastruktury badawczej pozwalającej na prowadzenie kompleksowych pomiarów. Urządzenia te posłużą jako rozszerzenie do istniejącej już infrastruktury badawczej składającej się z sieci optymizerów i falowników, dzięki której możliwym będzie zbudowanie nowego, niezależnego stanowiska badawczego wyposażonego w odpowiednio dobraną maszynę elektryczną. Do realizacji zadań projektu wykorzystane będą moduły różniące się konstrukcją, materiałami, technologią wykonania jak również parametrami elektrycznymi. W badaniach można uwzględnić min. moduły:

- monokrystaliczne,
- polikrystaliczne,
- posiadające białe i czarne backsheety,
- moduły dwustronne,
- PERC,
- wykonane z krzemu mikrokrystalicznego,
- barwnikowe,
- wielozłącznikowe,
- wykonane w technologii HIT.

Dywersyfikacja taka pozwoli na szeroką analizę parametrów energetycznych dostępnych aktualnie na rynku rozwiązań. Wśród producentów badanych modułów znajdują się firmy będące światowymi liderami w produkcji modułów fotowoltaicznych.

Cały układ wyposażony będzie dodatkowo w pyranometr, czyli instrument służący do pomiaru hemisferycznego promieniowania całkowitego, rozproszonego i odbitego, czyli całego widma światła słonecznego. Pyranometr mierzy irradancję, tj. strumień przychodzącej energii słonecznej podawany w watach na metr kwadratowy. Urządzenia te wymagają cyklicznej kalibracji. Jest ona potrzebna ze względu na stopień wiarygodności dokonywanych pomiarów pracy modułów PV. W celu przeprowadzenia rzetelnej agregacji danych w projektach badawczych wymaga się kalibracji co dwa lata.

W pracach przewiduje się również zbudowanie systemu akwizycji danych umożliwiającego zdalny pomiar parametrów pracy każdego mo-

dułu PV z osobna, jak również ciągły podgląd parametrów pracy badanej maszyny elektrycznej.

### 3. Metodyka badawcza

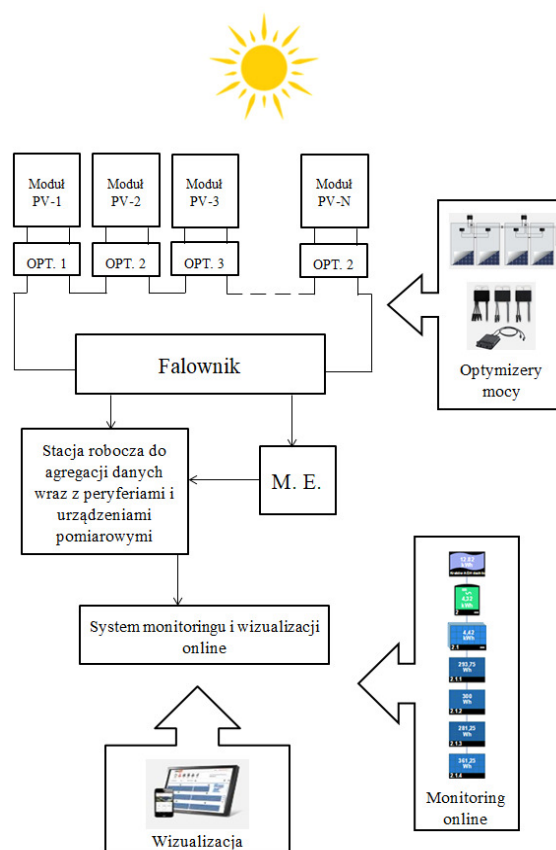
Trwają prace przygotowawcze mające na celu zbudowanie stanowiska pomiarowego do badania wpływu zasilania maszyn elektrycznych energią elektryczną pochodzącą z układu fotowoltaicznego zdywersyfikowanego pod kątem różnych rozwiązań technologicznych modułów PV. Uproszczony schemat ideowo-blokowy został przedstawiony na rysunku 1. Metodyka badawcza zakłada zestawienie kilku modułów fotowoltaicznych różniących się od siebie technologią wykonania, konstrukcją jak również parametrami elektrycznymi [6, 8]. Każdy moduł wystawiony będzie na promieniowanie słoneczne w tym samym czasie i w tej samej lokalizacji.

W przeprowadzaniu badań uwzględnia się następujące kroki:

- zestawienie kilku różnych technologicznie modułów PV w jeden system pomiarowy;
- podłączenie każdego modułu do optyimizera mocy i kolejno do falownika;
- dzięki zastosowaniu sieci połączeń modułów opartych o optyimizery mocy, możliwym będzie skonstruowanie systemu pomiarowego umożliwiającego agregację danych i wgląd w pracę indywidualnie dla każdego modułu działającego w obrębie zbudowanej architektury;
- pobieranie danych oddzielnie dla każdego modułu poprzez stworzony w tym celu specjalny system online umożliwiający ciągły dostęp i analizę pracy;
- pomiar parametrów i charakterystyki pracy maszyny elektrycznej zasilanej z proponowanego układu wyposażonego w moduły PV;
- porównanie uzysków energetycznych z poszczególnych modułów w odniesieniu do jakości dostawy energii elektrycznej [4, 5, 6];
- odniesienie wyników pomiarów do wskazań pyranometrów mierzących irradancję, czyli strumień przychodzącej energii słonecznej (podawaną w watach na metr kwadratowy);
- porównanie warunków pracy poszczególnych modułów z uwzględnieniem danych pochodzących z pyranometrów obrazujących tło pogodowe;

- zestawienie danych pomiarowych z pracy maszyny elektrycznej i odniesienie ich do pracy tej samej maszyny zasilanej ze standardowej sieci elektroenergetycznej;

- przeprowadzenie obliczeń w środowiskach Matlab i Microsoft Office w celu analizy danych pomiarowych, jak również ich graficznej reprezentacji.



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowo-blokowy stanowiska badawczego  
 Moduł PV - moduł fotowoltaiczny  
 M.E.- maszyna elektryczna  
 OPT.- optyimizer mocy

### 4. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję stanowiska badawczego z maszyną elektryczną zasilaną z układu wyposażonego w moduły PV. Energia elektryczna pochodząca z ogniw fotowoltaicznych jest jedną z kluczowych kwestii rozwoju nowoczesnej energetyki opartej na zrównoważonym poszanowaniu energii. Stan ten został zobrazowany w przytoczonych opracowaniach Ministerstwa Energii [2, 3] zawierających analizę oddziaływania polityk i środków, które wskazują w jaki sposób i z jakimi skutkami zrealizowane zostaną cele

w pięciu wymiarach unii energetycznej, w tym tzw. cele klimatyczno-energetyczne. Z dokumentów wynika, iż w najbliższych latach, w Polsce należy spodziewać się mocnego wzrostu ilości energii elektrycznej produkowanej przez instalacje fotowoltaiczne. Konsekwencją takiego założenia jest nieunikniony wzrost liczby instalacji PV dostępnych w naszym kraju. Prognozy takie stwarzają szansę dla rozwoju rynku maszyn elektrycznych z uwzględnieniem ich pracy w systemach opartych o zasilanie energią elektryczną z układów wyposażonych w moduły PV. Wobec czego zasadnym jest prowadzenie badań naukowych w kierunku optymalizacji konstrukcji i technologii wykorzystywanych do produkcji zarówno modułów PV jak i maszyn elektrycznych.

## 5. Literatura

- [1]. M. Niechaj "Aspekty współpracy maszyn elektrycznych i generatorów fotowoltaicznych". *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 75, str. 217-222, 2006.
- [2]. Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. *PROJEKT – w. 3.1 z 04.01.2019*. Ministerstwo Energii, 2019.
- [3]. Ocena skutków planowanych polityk i środków Załącznik 2. Do Krajowego planu na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. *PROJEKT – w. 3.1 z 04.01.2019*. Ministerstwo Energii, 2019.
- [4]. Z. Hanzelka, *Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia*. 2013.
- [5]. Z. Hanzelka Z., A. Firlit, *Elektrownie ze źródłami odnawialnymi : zagadnienia wybrane*. 2015.
- [6]. I. Wasiak, R. Pawełek, "Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną". 2015.
- [7]. Z. Bo, W. Caisheng, Z. Xuesong, "Grid-Integrated and standalone photovoltaic distributed generation systems. Analysis, design, and control". 2015.
- [8]. W. C. Sinke, "Development of photovoltaic technologies for global impact". *Renewable Energy*, Volume 138, pages 911-914. 2019.
- [9]. M. Niechaj "Autonomiczny fotowoltaiczny system napędowy bez elektrycznego źródła buforowego z silnikiem indukcyjnym jednofazowym". *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1, str. 189-194, 2013.
- [10]. M. Niechaj "Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w fotowoltaicznym systemie napędowym". *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 77, str. 91-95, 2007.
- [11]. <https://www.solaredge.com/us/products/power-optimizer#/>
- [12]. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Pyranometr#/media/File:SR20\\_pyranometer\\_1.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Pyranometr#/media/File:SR20_pyranometer_1.jpg)

## Autorzy

mgr inż. Krzysztof Piech

Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

e-mail: kpiech@agh.edu.pl