

Praktyka wykonywania pomiarów instalacji fotowoltaicznych prowadząca do określenia rzeczywistego stanu technicznego

Streszczenie. Praca przedstawia zasady wykonywania pomiarów instalacji fotowoltaicznych wg normy PN-EN 62446-1. Proponowany w normie zakres podstawowy pozwala tylko na ocenę bezpieczeństwa pracy instalacji. Dopiero zakres dodatkowy umożliwia uzyskanie informacji o referencyjnych mocach zainstalowanej elektrowni, jej sprawności, a nawet jednorodności poszczególnych ogniw fotowoltaicznych. Załączone przykłady pomiarów czystych i zabrudzonych paneli wskazują na korzyści monitorowania stanu technicznego instalacji podczas ich eksploatacji.

Abstract. The publication outlines the methodologies for conducting measurements on photovoltaic installations as per the PN-EN 62446-1 standard. The fundamental scope proposed facilitates assessing the operational safety of the installation. However, only by expanding the measurement scope can one acquire data regarding the reference powers of the installed power plant, its efficiency, and even the consistency across individual photovoltaic cells. Through examples of measuring both clean and dirty panels, the publication demonstrates the advantages of monitoring the technical condition of installations during their operation. (**Measurement practice of photovoltaic installations leading to the determination of the actual technical condition**).

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, pomiary elektryczne, pomiary termowizyjne, wpływ zanieczyszczeń.

Keywords: photovoltaic installation, electrical measurements, thermal imaging measurements, impact of pollution.

Wstęp

W Polsce od początku 2019 roku do sierpnia 2023 roku odnotowano lawinowy, 24-krotny wzrost liczby instalacji fotowoltaicznych w większości o niewielkich mocach do 10 kW instalowanych w gospodarstwach domowych. Przy dużym wzroście zapotrzebowania montażu instalacji fotowoltaicznych zdarza się, że usługi te realizuje się niezgodnie z zasadami wiedzy technicznej i wytycznymi norm i przepisów [1-5]. Zauważa się brak poprawnego wykonania na etapie montażu i niepełne odbiory techniczne według [4, 6], co powoduje problemy w późniejszym użytkowaniu instalacji, a w skrajnych wypadkach nawet jej uszkodzenie lub pogorszenie funkcjonalności.

Instalacja fotowoltaiczna składa się z urządzeń elektrycznych takich jak: panele fotowoltaiczne, okablowanie, urządzenia typu falowniki wytwarzające napięcie DC z napięcia stałego DC oraz zabezpieczenia po stronie AC i AC, kabel WLZ do złącza pomiarowego.

Elektrycy wykonujący instalacje fotowoltaiczne powinni posiadać uprawnienia kwalifikacyjne E do 1 kV lub bez ograniczeń napięciowych w grupie 1: Urządzenia, instalacje i sieci elektroenergetyczne wytwarzające, przetwarzające i zużywające energię elektryczną w zakresie: obsługi, konserwacji, eksploatacji i montażu. Dodatkowo wskazane aby posiadali certyfikat potwierdzający posiadanie kwalifikacji do wykonywania instalacji odnawialnych źródeł energii, w tym systemów fotowoltaicznych wydawany przez Urząd Dozoru Technicznego. W przypadku odbioru instalacji osoby wykonujące badania pomontażowe powinny posiadać uprawnienia kwalifikacyjne eksploatacji i dozoru dla wspomnianej wcześniej grupy 1.

Wytyczne dotyczące zakresu pomiarów

W celu uniknięcia oczywistych błędów krytycznie ograniczających poziom bezpieczeństwa eksploatacyjnego instalacji należy wykonywać odpowiednie oględziny i pomiary. Szczegółowe zestawienie czynności jakie należy wykonać podczas oględzin zawiera norma [4]. Minimalne zestawienie pomiarów dla programu podstawowego zawiera tabela 1.

Badania podstawowe można rozszerzyć w celu wyznaczenia charakterystyk prądowo – napięciowych poszczególnych paneli i/lub stringów oraz na potrzeby

określenia i analizy rozkładu temperatury metodą termowizyjną na powierzchniach roboczych paneli [4]. Zazwyczaj tego rodzaju działania są zaniechane na etapie odbioru, a wyłącznie one potwierdzają pełną funkcjonalność zbudowanej elektrowni fotowoltaicznej. Na ich podstawie odbiorca uzyskuje m. in. informację o generowanej mocy w warunkach standardowego oświetlenia, możliwość oceny jakości wykonania paneli i układu przetwarzania energii na podstawie analizy natężenia promieniowania słonecznego i sprawności falownika. Tego rodzaju dane ułatwiają niewątpliwie przeprowadzanie kolejnych badań eksploatacyjnych, dla których użytkownik posiada odpowiednie charakterystyki referencyjne [5].

Tabela 1. Program badań podstawowych wynikający z normy [4]

ogłędziny	pomiary podstawowe
<ul style="list-style-type: none"> - ocena stabilności pokrycia dachowego, - wpływu konstrukcji wsporczej i modułów na konstrukcję dachu (szczelność), - stan elementów mocujących (pęknięcia, uszkodzenia) - sprawdzenie prawidłowości montażu okablowania i ochrony przed skutkami cieplnymi, - sprawdzenie prawidłowości doboru elementów instalacji i ich zabezpieczeń, - sprawdzenie prawidłowości oznaczenia przewodów neutralnych i ochronnych, - sprawdzenie oznakowania instalacji, - sprawdzenie poprawności połączeń przewodów, - sprawdzenie prawidłowego i kompletnego oznaczenia obwodów bezpieczników, łączników, zacisków), 	<ul style="list-style-type: none"> - pomiar rezystancji izolacji po stronie AC, - pomiar impedancji pętli zwarcia po stronie AC - pomiar rezystancji uziemienia, - sprawdzenie polaryzacji i ciągłości przewodów, w tym ochronnych, - pomiar rezystancji izolacji po stronie DC - pomiar napięcia obwodu otwartego dla poszczególnych stringów , - pomiar prądu zwarcia modułów dla poszczególnych stringów , - określenie prądów w obwodach wejściowych i wyjściowych falownika), - próby funkcjonalne działania poszczególnych elementów instalacji, - badania wykonać przy natężeniu promieniowania słonecznego 400 + 700 W/m² z przeliczeniem na warunki standardowego oświetlenia

W celu wykonania pomiarów podstawowych stosuje się typowe przyrządy wykorzystywane w pomiarach ochronnych instalacji dla stwierdzenia poprawności ochrony podstawowej, przy pierwszym uszkodzeniu i uzupełniającej [3-5]. Można stosować przyrządy uniwersalne z możliwością wykonania pomiaru rezystancji izolacji i uziemień, pętli zwarcia, badania wyłączników różnicowoprądowych lub rozwiązania dedykowane poszczególnym

rodzajom pomiarów. Pewne utrudnienie stanowią pomiary wykonywane w instalacji stałoprądowej, gdyż tu wymaga się pomiaru rezystancji izolacji (zazwyczaj pod napięciem - panele PV wytwarzają napięcie), a dodatkowo pomiaru napięcia obwodu otwartego (wystarczy woltomierz o odpowiednim zakresie pomiarowym) i prądu przy zwarceniu zacisków modułu lub pierścienia najlepiej dodatkowo z pomiarem mocy promieniowania słonecznego.

Do pomiarów dodatkowych przeprowadzanych w warunkach natężenia promieniowania słonecznego z zakresu $400\text{--}700\text{ W/m}^2$ konieczne są przyrządy wymuszające różne prądy obciążenia w celu określenia przebiegu charakterystyki napięciowo - prądowej oraz kamera termowizyjna z możliwością uwzględnienia współczynnika emisyjności, temperatury i wilgotności w warunkach pomiaru.

Po montażu wszystkich elementów instalacji należy wykonać oględziny, badania i pomiary końcowe: rezystancji izolacji, ochrony od porażeń, badania obciążenia na poszczególnych obwodach, badania pomontażowe rozdzielnic i wszystkie niezbędne próby i testy zainstalowanych urządzeń. Zakres pomiarów i testów wykonanej instalacji należy przeprowadzić zgodnie z wytycznymi, zawartymi w dokumentacji techniczno - ruchowej producenta, które powinny być zgodne z wymaganiami norm [1, 3-5].

Na etapie badań podstawowych przy prawidłowo wykonanych oględzinach uzyskujemy wiedzę o prawidłowym wykonaniu i bezpieczeństwie instalacji. Jednak tego rodzaju badanie nie pozwala określić jakości wykonania i uzyskać danych na temat początkowej sprawności inwestycji. Wzorcowe dane referencyjne są w przyszłości konieczne do ewentualnych rozróżnień gwarancyjnych oraz porównania wyników pomiarów wykonanych w późniejszym okresie. Pozwalają natychmiast ocenić aktualną sprawność instalacji, a nawet zlokalizować panele o nieprawidłowej strukturze wynikającej z uszkodzeń wewnętrznych lub zabrudzeń, których wpływ opisano szczegółowo w dalszej części artykułu.

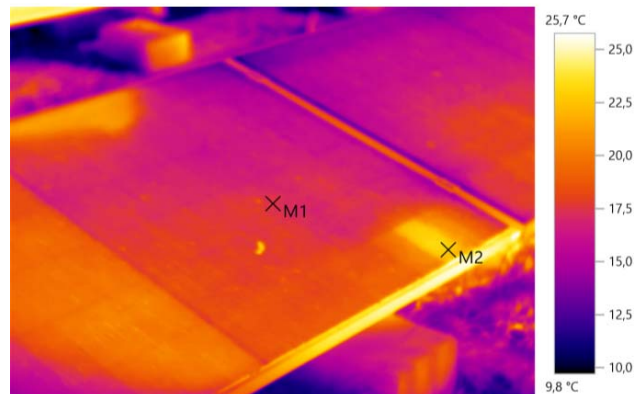
Przykład pomiaru środowiskowego

Zanieczyszczenia mają duży wpływ na charakterystykę prądowo - napięciową paneli PV [8]. Pomiary przeprowadzono dla łańcucha składającego się z paneli czystych i pokrytych warstwą zanieczyszczeń, które osadziły się na powierzchni paneli przez pół roku ekspozycji w warunkach miejskich. Powstała warstwa osadów opisano za pomocą wyników badań materiałowych, co może pomóc w porównaniu uzyskanych rezultatów do danych zmierzonych przez inne zespoły badawcze.



Rys. 1. Badawcza instalacja PV na terenie Politechniki Gdańskiej

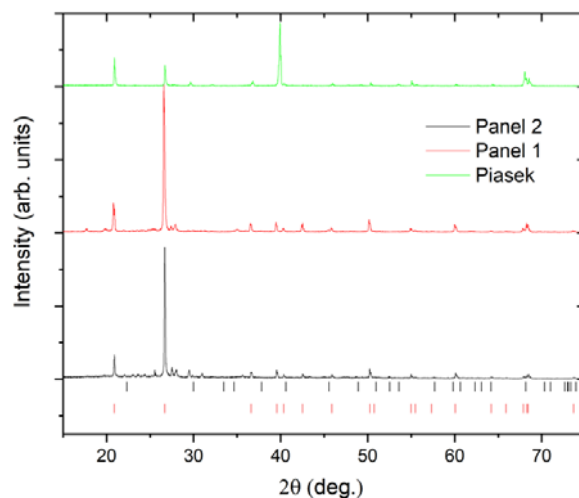
Do badań wykorzystano zestaw paneli PV zainstalowanych przed budynkiem Wysokich Napięć należącym do Politechniki Gdańskiej. Instalacja składa się z identycznych paneli firmy Swiss Solar połączonych szeregowo w łańcuchy liczące 4 moduły (rys. 1) na których rozkład temperatury w warunkach obciążenia prądem stałym (około 5 A) jest poprawny za wyjątkiem jednego z 8 paneli na którym widać wyraźnie obszar podwyższonej temperatury (hot - spot).



Rys. 2. Obszar podwyższonej temperatury na jednym z paneli obciążonym prądem 5 A, $X_{M1} - 17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X_{M2} - 23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

W celu uzyskania miarodajnych wyników wyznaczono charakterystyki prądowo - napięciowe dla paneli czystych i pokrytych warstwą pyłków w identycznych warunkach oświetleniowych. Pomiary charakterystyk wykonano analizatorem PROVA 1011 komunikującym się z czujnikiem irradancji i temperatury.

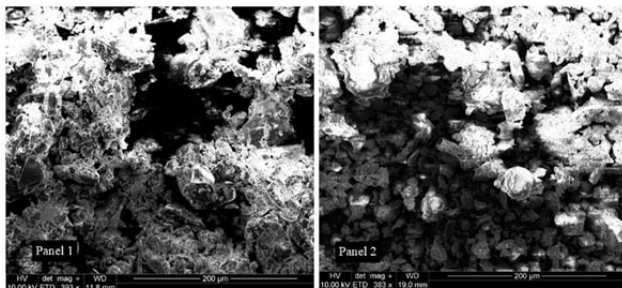
Analizowany panel 1 posiadał równomierną cienką warstwę pyłków, a na powierzchni panelu 2 znajdowały się dodatkowo zanieczyszczenia w formie grudek. Dla zebranych z powierzchni paneli próbek zanieczyszczeń oraz dla próbki referencyjnej (pobrane z podłoża w okolicy paneli piasek) wykonano badania metodą proszkowej dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (pXRD). W tym celu wykorzystano dyfraktometr Bruker D2Phaser, który jest wyposażony w lampę miedzianą o długości fali promieniowania $\text{CuK}\alpha$ równej $1,54\text{ \AA}$ oraz detektor XE-T. Pomiary przeprowadzono w zakresie kątów 15° do 90° z prędkością $5^{\circ}/\text{min}$, a uzyskane wyniki przedstawiono w postaci dyfraktogramów na rys. 3.



Rys. 3. Dyfraktogramy pXRD dla próbek zanieczyszczeń zebranych z paneli PV oraz dla próbki referencyjnej. Pionowe znaczniki odpowiadają pozycją refleksów braggowskich dla $\text{Ca}_{0,96}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}_{0,01}(\text{CO}_3)$ (czarne) oraz SiO_2 (czerwone)

Zbadane próbki mają charakter typowy dla materiałów polikrystalicznych, co świadczy o mineralnym pochodzeniu warstwy zanieczyszczeń. Na dyfraktogramach nie występuje podniesienie tła w zakresie kątów 15° do 40° , które mogłoby sugerować znaczący udział faz amorficznych pochodzenia organicznego. Struktura krystaliczna osadu z obu paneli jest podobna. Jako główne fazy zidentyfikowano związki $\text{Ca}_{0,96}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}_{0,01}(\text{CO}_3)$ (domieszkiwany węgiel wapnia, podstawowy składnik wielu minerałów) oraz SiO_2 (krzemionka), które są typowymi składnikami gleby. Dla próbki pobranej z panelu 1 występują również niewielkie refleksy od dodatkowych faz, których nie udało się zidentyfikować. Pobrane w pobliżu paneli piasek różni się znacząco od osadu z ich powierzchni, gdyż składa się głównie z krzemionki.

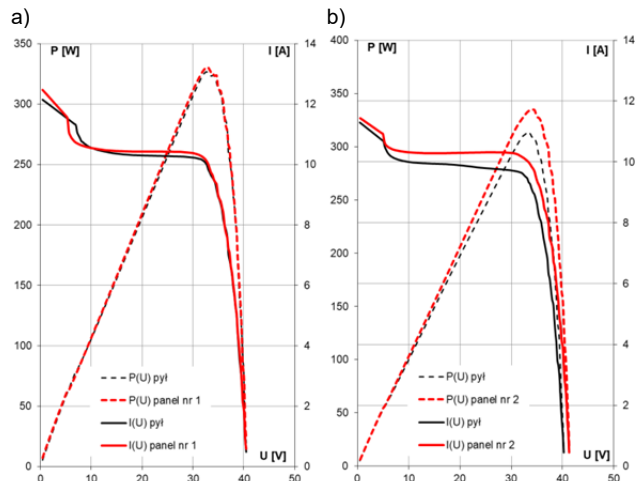
Morfologię powierzchni zebranych próbek zobrazowano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) FEI Quanta FEG250. Na podstawie rys. 4 można stwierdzić, że próbka pobrana z panelu 1 ma drobniejszą ziarnistość niż z panelu 2. Obie próbki charakteryzowały się niską przewodnością elektryczną, gdyż elektryzowały się w trakcie pomiaru, co prowadziło do odrywania się niektórych ziaren proszku od podstawki pomiarowej.



Rys. 4. Obrazy SEM dla próbek zanieczyszczeń pobranych z powierzchni paneli PV

Na podstawie przeprowadzonych badań materiałowych stwierdzono, że zanieczyszczenia na powierzchni paneli mają typowo mineralny charakter. Drobnoziarnistość przebadanego pyłu oraz jego skład chemiczny sugerują, iż może to być materiał stanowiący zarodki kondensacyjne kropel deszczu [6]. Zanieczyszczenia o większej średnicy usuwane są na skutek działania mechanizmu samooczyszczania powierzchni przez wiatr i deszcz. Pył ten jest rozmieszczony na powierzchni paneli równomiernie przez co nie stanowi większego zagrożenia pod kątem pożarowym, gdyż nie powoduje powstawania *hot – spotów*. Pod tym względem dużo większy problem stanowią ptasie odchody lub grudki zanieczyszczeń zaciągające jedynie wybrane fragmenty zbadanej powierzchni, co wykazały zmierzone charakterystyki

Na rys. 5 ukazano charakterystyki prądowo - napięciowe oraz zależność mocy od napięcia dla paneli 1 i 2. Dane pomiarowe zebrano z zanieczyszczonych paneli, a następnie umyto je za pomocą wody destylowanej, aby nie pozostawić na ich powierzchni osadów mineralnych, które mogłyby przekłamywać otrzymane wyniki. Pomiar powtórzono niezwłocznie po umyciu paneli w celu zapewnienia identycznych warunków eksperymentalnych. Analizując uzyskane wykresy można stwierdzić, że w przypadku panelu 1 nie odnotowano znaczącego spadku wydajności. Zjawisko to można wytłumaczyć efektem kompensacji spadku mocy związanej z zwiększonym rozpraszaniem światła poprzez ograniczenie nagrzewania paneli, które prowadzi do ich mniejszej wydajności. W przypadku panelu 2 widoczny jest wyraźny wpływ zanieczyszczeń na generowaną moc oraz odkształcenie charakterystyki prądowo – napięciowej [7].



Rys. 5. Zależność mocy oraz prądu od napięcia dla a) panelu 1 oraz b) panelu 2 przed i po procesie czyszczenia

Podsumowanie i wnioski

Wyłączenie badania w zakresie podstawowym i dodatkowym pozwalają na zdobycie pełnej wiedzy o jakości zainstalowanych paneli i poprawności pracy falownika z nim współpracującego.

Uzyskane dane umożliwiają prawidłową ocenę stanu technicznego (sprawność) w przyszłości w celu ewentualnych roszczeń gwarancyjnych. Dodatkowo chcąc poprawić wydajność poszczególnych łańcuchów otrzymujemy informację co do konieczności ewentualnego czyszczenia [8] lub wymiany uszkodzonych modułów.

Zestaw podstawowy pomiarów (kategoria 1) umożliwia jedynie stwierdzenie braku zagrożeń i prawidłowej ochrony przeciwporażeniowej dla wykonanej instalacji.

Pomiary termowizyjne oraz charakterystyk paneli przeprowadzane w ramach testów dodatkowych (kategoria 2) są czułym detektorem wewnętrznych uszkodzeń i zanieczyszczeń [7, 8] w panelach fotowoltaicznych.

Autorzy: dr inż. Leszek Litzbarski, leszek.litzbarski@pg.edu.pl; dr hab. inż. Marek Olesz, marek.olesz@pg.edu.pl; mgr inż. Konrad Seklecki, konrad.seklecki@pg.edu.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,

LITERATURA

- [1]. PN-HD 60364-7-712:2016-05 - Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji - Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania
- [2]. Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 8 kwietnia 2019 w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz.U. 2019 poz. 1065
- [3]. Norma PN-HD 60364-6:2016 - Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 6: Sprawdzanie
- [4]. PN-EN 62446-1:2016-08, Systemy fotowoltaiczne (PV) - Wymagania dotyczące badań, dokumentacji i utrzymania - Część 1: Systemy podłączone do sieci - Dokumentacja, odbiory, nadzór
- [5]. PN-EN IEC 62446-2:2020-12, Systemy fotowoltaiczne (PV) - Wymagania dotyczące badań, dokumentacji i utrzymania - Część 2: Systemy podłączone do sieci - Utrzymanie systemów PV
- [6]. Kollipara P., "Minor dust mineral may be key ice seed" *Chemical & Engineering News*, vol. 91 (2013), no. 24, p. 9
- [7]. Javed W., Guo B., Figgis B., Aissa B., Dust potency in the context of solar photovoltaic (PV) soiling loss, *Solar Energy*, Volume 220 (2021), pp. 1040-1052
- [8]. Ekinci F. i inni, Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method, *Solar Energy*, Volume 237 (2022), pp. 1-10