

Wpływ czynników zewnętrznych na stabilność parametrów modułów fotowoltaicznych

Artykuł opracowano w ramach projektu: „Pozyskanie wiedzy technicznej nt. współdziałania komponentów elektronicznych w inwerterze fotowoltaicznym dla aplikacji BIPV” (UDA-RPPK-01.03.00-18-035/13-00)

Problem stabilności parametrów elektrycznych modułów fotowoltaicznych istnieje już od momentu utworzenia krzemowych ogniw fotowoltaicznych – miało to miejsce w 1946 roku za sprawą Russella Ohl, który pracując w zakładach AT&T Bell Labs (American Telegraph and Telephone Bell Labs) opublikował patent pierwszego elektrycznego urządzenia światłoczułego, którego budowa opierała się na krzemie („*Light-sensitive electric device*” US 2402662). Do tego czasu metody wykonywania krzemowych ogniw fotowoltaicznych i ich rodzaje wykonania znacznie się zmieniły zarówno pod względem wielkości tak i pod względem parametrów elektrycznych. Nie zmieniło się natomiast oddziaływanie czynników zewnętrznych, które to w większym lub mniejszym stopniu powodują zmianę parametrów pracy ogniw fotowoltaicznych, z których wykonywane są obecnie moduły fotowoltaiczne.

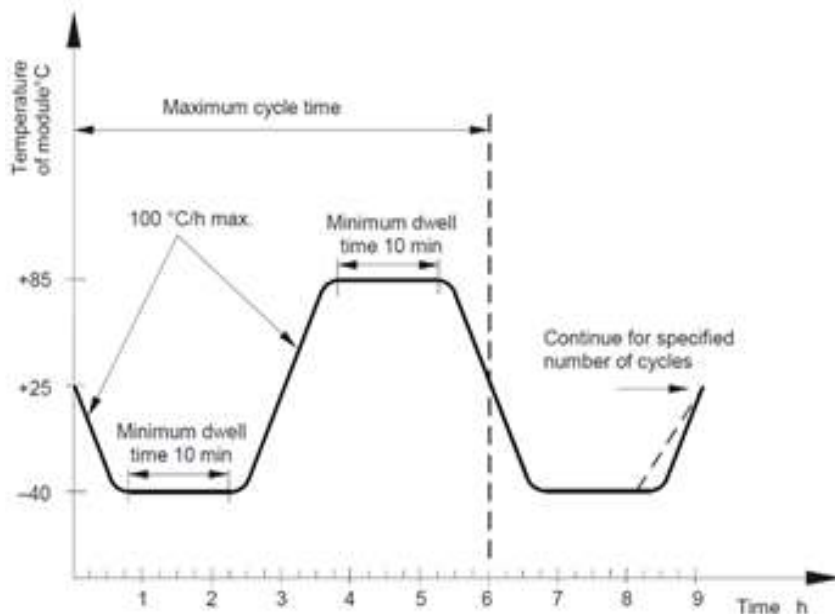
Grupa krzemowych ogniw fotowoltaicznych zawierająca w sobie technologię polikrystaliczną, mono-krystaliczną, HJT oraz back contact nie jest jedyną grupą ogniw obarczonych problemem zmiany ich parametrów. Na tą samą przypadłość jest podatna także grupa ogniw

cienkowarstwowych, do której należą takie technologie wykonania ogniw jak: CdTe – tellurek kadmu (*Cadmium Telluride*); CIGS – połączenie miedzi z indem, galem oraz selenem (*Copper-Indium-Gallium-Selenide*); μ A-Si – ogniwa krzemowe mikromorficzne (*Micromorphous Silicone*); DSSC – ogniwa organiczne (*Dye-Sensitized Solar Cell*).

W wyniku przeprowadzonego projektu pod nazwą „Pozyskanie wiedzy technicznej nt. współdziałania komponentów elektronicznych w inwerterze fotowoltaicznym dla aplikacji BIPV” przeprowadzono szereg badań mających na celu poznanie skutków oddziaływania zmian zewnętrznych czynników atmosferycznych na zakres wartości zmian parametrów elektrycznych badanych paneli fotowoltaicznych, które w wyniku swoich zmian oddziałują na stabilność pracy przyłączonych do nich układów jednostek przetwórczych i tym samym na ich efektywną pracę związaną z przekształcaniem i oddawaniem wytworzonej energii elektrycznej do sieci użytkowej.

Badaniom poddano osiem różnych typów paneli fotowoltaicznych: polikrystalicznych; mono-krystalicznych; back contact; HJT; CIGS; CdTe; DSSC; μ A-Si. W pierwszej

kolejności poszczególne panele poddano badaniu w komorze klimatycznej, w której przeprowadzono proces cyklicznej zmiany temperatury w zakresie zgodnym z procesem badawczym realizowanym w ramach procesu numer 10.11 wykonywanego według normy dla fotowoltaicznych modułów krzemowych – IEC 61215 (Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval) oraz dla fotowoltaicznych modułów cienko-warstwowych – IEC 61646 (Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval). Przykład pojedynczego cyklu realizowanego w ramach badania przedstawiony został na rysunku 1. Druga seria badań została przeprowadzona w warunkach symulowanego naporu wiatru na moduł fotowoltaiczny. Ze względu na brak odpowiednich norm regulujących sposób tego typu badania, proces symulacji został opracowany indywidualnie i obejmował zmianę ciśnienia symulującego parcie oraz ssanie wiatru o odpowiadającym mu prędkościom wiatru z zakresu od 0 do 160 km/h panującego po jednej z stron badanego modułu, która była szczelnie umocowana do komory badawczej.



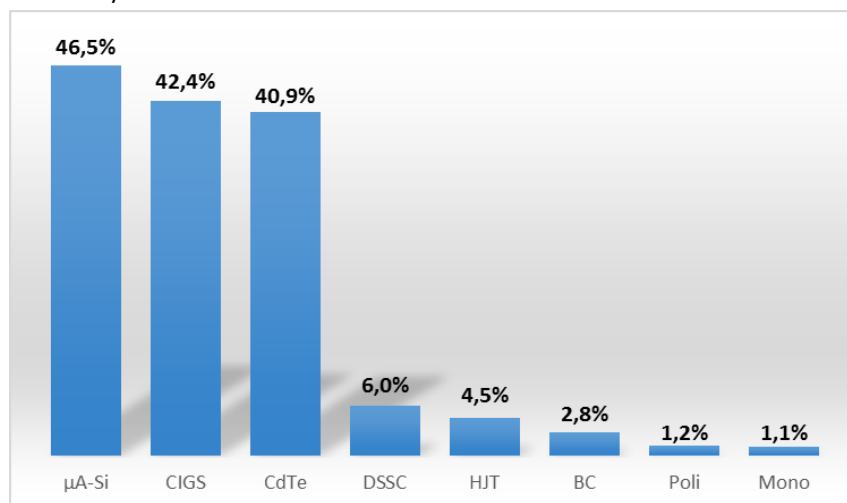
Rys. 2. Charakterystyka minimalnych i maksymalnych wartości zmian temperatury i minimalny czas ich trwania dla pojedynczego cyklu [źródło: norma IEC 61215]

W wyniku przeprowadzenia w komorze klimatycznej pięćdziesięciu zmian cyklu grzania i chłodzenia (nadmienić należy, że jakiegokolwiek badania w komorach klimatycznych są bardzo czasochłonne) wyznaczono charakterystyki prądowo napięciowe dla każdej z technologii badanych modułów fotowoltaicznych. Dla zachowania parametrów porównawczych, tą samą charakterystykę wykreślono jeszcze przed przystąpieniem do testów w komorze. Dzięki temu możliwe jest dokonanie porównania wpływu długotrwałego oddziaływania zmian drastycznych wartości temperatur od najniższej granicy -40°C oraz do najwyższej $+85^{\circ}\text{C}$, na wartości parametrów charakterystyki prądowo napięciowej. Nadmienić należy, że dla zachowania spójności środowiska pomiarowego badane moduły były odizolowane od wpływu światła zewnętrznego. Następnie do badanych modułów był wymuszany przepływ prądu realizowany przy pomocy dołączonego do ich zacisków programowalnego zasilacza o niskim poziomie tętnień i wraz z nim dołączono do toru pomiarowego zespół mierników precyzyjnych mierzących zarówno prąd jak i

napięcie. Dzięki wyeliminowaniu wpływu światła oddziaływującego na badane moduły, możliwe było wyznaczenie charakterystyk prądu ciemnego i ich późniejsze porównanie.

Na rysunku 2, w formie graficznej, przedstawione zostały zebrane i porównane ze sobą różnice pomiędzy charakterystyką prądowo-napięciową przed dokonaniem testów w komorze klimatycznej oraz po wykonanych testach w komorze klimatycznej. Jak można zaobserwować z przedstawionego porównania, istnieje pewna zależność pomiędzy testowanymi modułami fotowolta-

icznymi. Zdecydowaną różnicę pomiędzy badanymi charakterystykami wykazały moduły fotowoltaiczne wykonane w technologii mikro-morficznej ($\mu\text{A-Si}$), CIGS oraz CdTe. Wszystkie te technologie należą do grupy technologii cienko-warstwowych, które charakteryzuje duża podatność zmiany parametrów elektrycznych pod wpływem nawet nieznacznych zmian temperatury – do $-0,37\%/^{\circ}\text{C}$ dla zmian wartości napięcia V_{oc} oraz $+0,1\%/^{\circ}\text{C}$ dla zmian I_{sc} w przypadku modułów $\mu\text{A-Si}$ i dla porównania $-0,29\%/^{\circ}\text{C}$ dla V_{oc} i $+0,04\%/^{\circ}\text{C}$ w przypadku modułów CIGS. Wśród pozostałej grupy technologii wykonania ogniw fotowoltaicznych, nie wystąpiły znaczne różnice pomiędzy otrzymanymi charakterystykami, co może świadczyć o większej trwałości materiału, z którego wykonane są ogniwa. Przykładowe wartości współczynników zmian parametrów elektrycznych to dla ogniw typu back contact $-0,27\%/^{\circ}\text{C}$ dla napięcia V_{oc} oraz $+0,05\%/^{\circ}\text{C}$ dla I_{sc} . Odpowiednio typowe ogniwo monokrystaliczne posiada ujemny współczynnik zmian napięcia wynoszący $-0,32\%/^{\circ}\text{C}$ oraz temperaturowy współczynnik zmian prądu wynoszący $+0,05\%/^{\circ}\text{C}$. Wśród technologii cienkowarstwowych najlepszym pod względem



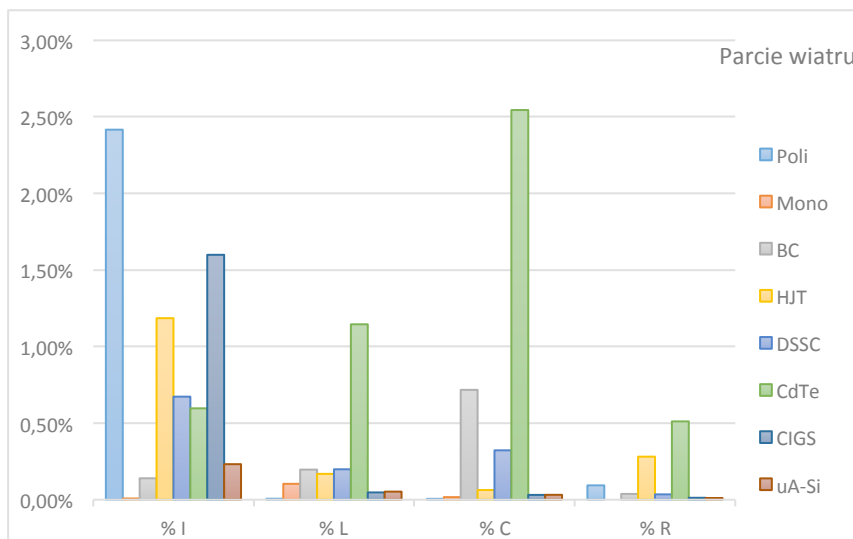
Rys. 1. Zestawienie względnego porównania wartości parametrów charakterystyki prądowo-napięciowej przed i po wykonaniu testów w komorze klimatycznej dla każdego z typów badanych modułów fotowoltaicznych.

stabilności parametrów w czasie okazała się technologia DSSC, która jako jedyna z całej grupy wynosi tylko około 6%. Dla drugiej grupy ogniw, sytuacja nie jest wprost widoczna. Powstałe wśród badanych modułów różnice są nieznaczne i najbardziej niekorzystnie, z wartością ok 4,5% próżnicy wykazała technologia ogniw HJT.

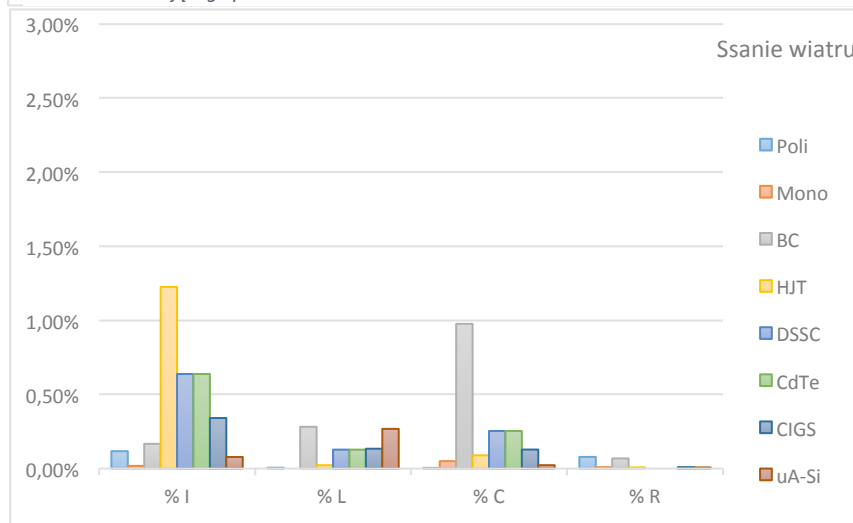
Druga część przeprowadzonych badań, została zrealizowana w komorze umożliwiającej symulację oddziaływania stałego ciśnienia odpowiadającego danej prędkości wiatru na szczelnie umocowany w komorze moduł fotowoltaiczny. Przeprowadzane badanie polegało na zwiększaniu i zmniejszaniu wartości ciśnienia w komorze od wartości -1200 Pa do 1200 Pa symulując tym samym zmianę wartości prędkości oddziaływania wiatru na panel o prędkości z zakresu od 0 do 160 km/h zarówno dla jego parcia oraz ssania. W trakcie prowadzonego badania, pobierane były w dwóch turach parametry modułów. Parametry, jakie były obserwowane to zmiana wartości rezystancji, pojemności oraz indukcyjności modułu. Druga tura pomiaru związana była z pomiarem prądu ciemnego zrealizowana w sposób zbliżony do pomiaru realizowanego w komorze klimatycznej. Wszystkie pomiary zostały wykonane przy zablokowaniu oddziaływania światła zewnętrznego na panel fotowoltaiczny, które wpływałoby na niestabilność prowadzonego pomiaru. Wynikiem prowadzonych badań był szereg wartości pobieranych przy danych punktach prędkości wiatru i jego kierunku. Prowadząc analizę otrzymanych danych, wyznaczone zostały wartości procentowe odchyłeń od wartości średniej dla każdego z parametrów. Otrzymane wartości zostały przedstawione na

rysunku 3, na którym zobrazowane zostały maksymalne odchylenia od wartości średniej wszystkich badanych zmiennych dla parcia wiatru, a na rysunku 4 te same zależności, ale dla kierunku ssania wiatru. Jak można zaobserwować z przedstawionych rysunków, zmiana wartości oddziaływającego wiatru na badany moduł fotowoltaiczny ma wpływ na zmianę poszczególnych parametrów modułów. Sytuacja ta ma miejsce zarówno dla parcia jak i ssania wiatru. Modułem najbardziej podatnym na zmiany wygięcia modułu pod wpływem wiatru jest moduł wykonany technologii CdTe oraz polikrystalicznej z tym, że moduł

polikrystaliczny wykazywał tą właściwość tylko dla jednego z kierunków oddziaływania wiatru. Oczywisty jest fakt, że na powyższe parametry istotny wpływ ma sposób wykonania modułu to znaczy, czy jest on wykonany, jako laminat szklany (moduł typu szkło-szkło), szkło-tedlar, czy na krawędziach są użyte usztywniające ramki aluminiowe czy też nie. Jeśli przykładowo jest on wykonany, jako laminat szklany to, jaka jest jego kompozycja grubości szkła, jaka ilość folii została użyta do jego enkapsulacji i oczywiście jak dużą powierzchnię szkła użyto do jego budowy. Wszystkie moduły



Rys. 3. Graf zmian wartości procentowej prądu ciemnego (% I), indukcyjności (% L), pojemności (% C) i rezystancji (% R) od wartości średniej wraz z zmianą wartości prędkości oddziaływającego parcia wiatru



Rys. 4. Graf zmian wartości procentowej prądu ciemnego (% I), indukcyjności (% L), pojemności (% C) i rezystancji (% R) od wartości średniej wraz z zmianą wartości prędkości oddziaływającego ssania wiatru

fotowoltaiczne, jakie były badane w komorach charakteryzowały się tą samą budową typu szkło-szkło i zbliżoną do siebie grubością tak, aby wykonywany pomiar był porównywalny.

W wyniku przeprowadzonych badań, uzyskano informację o zakresie możliwych zmian parametrów w występujących na rynku modułów fotowoltaicznych. Zakres tych zmian pozwala na oszacowanie wymagań, jakie muszą spełniać urządzenia przetwórcze prądu i napięcia stałego na prąd i napięcie zmienne (inwertery fotowoltaiczne).

Już na etapie projektowania samej instalacji fotowoltaicznej, należy brać pod uwagę możliwe zmiany temperaturowe, które w sposób bezpośrednio powodują zmiany maksymalnych i minimalnych parametrów modułów fotowoltaicznych. Dla przykładu jeden z badanych modułów $\mu\text{A-Si}$ charakteryzował się stałym napięciem V_{oc} wynoszącym 140,4V oraz współczynnikiem jego zmian wynoszącym $-0,37 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Podane napięcie pracy obowiązuje jedynie w warunkach testowych przy temperaturze 25°C , a jak wiadomo w Polsce temperatura ta może sięgać nawet -20°C do $+65^{\circ}\text{C}$ (w przypadku zastosowania panelu w BIPV), powodując tym samym, że zakres zmian podanego napięcia V_{oc} będzie się zmieniał w zakresie od około 119 do 163,8 V.

Na takie zmiany musi być przygotowana instalacja, a sam zastosowany inwerter fotowoltaiczny musi także zapewniać stabilną pracę w warunkach zmiennego oświetlenia, zmian temperaturowych oddziałujących na dołączone do niego panele fotowoltaiczne oraz na zmiany parametrów, jakie zostały przedstawione w niniejszym artykule.