

Arc Guard: ochrona przed łukiem w systemach fotowoltaicznych

Spis treści

Wprowadzenie	3
Łuki w systemach PV	4
Wykrywanie i przerywanie łuku DC w systemach PV	6
Normy dotyczące ochrony przed zvarciami łukowymi PV	8
Fronius Arc Guard	9
Zwiększone bezpieczeństwo bez kompromisów dzięki Arc Guard	10
Bibliografia	11

Biała księga

© Fronius Polska Sp. z o.o.

Wersja 1.0 02/2024

Business Unit Solar Energy

Firma Fronius zastrzega sobie wszelkie prawa, w szczególności prawo do powielania, dystrybucji i tłumaczenia. Żadna część tego dokumentu nie może być w jakiegokolwiek formie: przechowywana, przetwarzana, powielana lub rozpowszechniana za pomocą systemów elektronicznych bez pisemnej zgody firmy Fronius. Informacje publikowane w niniejszym dokumencie, pomimo największej staranności w jego przygotowaniu, mogą ulec zmianie i ani autor, ani Fronius nie mogą przyjąć żadnej odpowiedzialności prawnej. Sformułowanie dotyczące płci odnosi się w równym stopniu do formy męskiej i żeńskiej.

Wprowadzenie

Obecne systemy fotowoltaiczne są bardzo bezpieczne. Funkcje takie jak RCMU (ang. Residual Current Monitoring Unit – układ monitorowania prądu upływu), rozłącznik DC i cykliczne badanie stanu izolacji przyczyniły się do osiągnięcia bardzo wysokiego poziomu bezpieczeństwa.

W Niemczech, na jednym z największych rynków fotowoltaicznych z ponad 2 milionami zainstalowanych systemów fotowoltaicznych, w ciągu ostatnich 20 lat pożary fotowoltaiczne wystąpiły w 0,006% wszystkich instalacji [1]. Oznacza to, że statystycznie 99,994% instalacji PV jest w pełni bezpiecznych. Podobne liczby odnotowano w Wielkiej Brytanii [2].

Tak więc, ilekroć mówimy o bezpieczeństwie przeciwpożarowym PV, należy pamiętać, że zawsze dotyczy to tych 0,006% systemów PV, które są statystycznie „zagrożone” pożarem, czyli 1 na 17 000 instalacji.

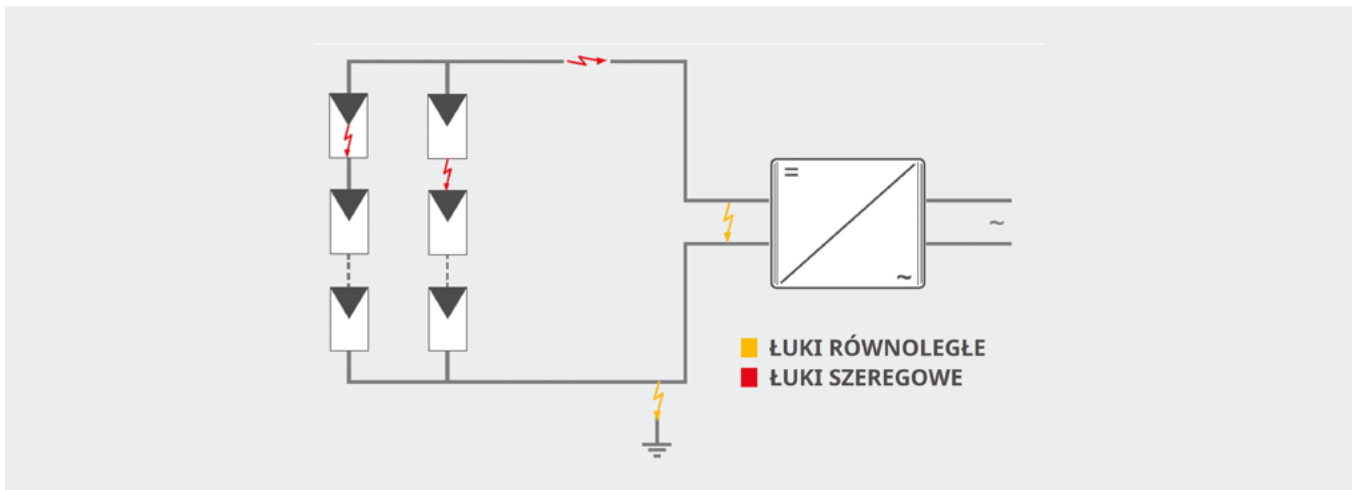
Aby jeszcze bardziej zmniejszyć ryzyko pożaru systemów, można rozważyć dodatkowe środki bezpieczeństwa, w tym:

- środki instalacyjne (np. zapewnienie odpowiedniej wentylacji, unikanie gromadzenia się materiałów łatwopalnych oraz prawidłowy montaż przewodów i złączy [3]), lub
- środki oparte na wyposażeniu technicznym, takim jak urządzenia zabezpieczające ziemnozwarciowe i łukowe.

Ponieważ jednak odsetek systemów statystycznie bezpiecznych jest już bardzo wysoki, należy zachować szczególną ostrożność przy doborze dodatkowych środków, aby nie miały one negatywnego wpływu na inne aspekty bezpieczeństwa. Ochrona przed zwarciami łukowymi jest dobrym przykładem środka bezpieczeństwa, który skutecznie zmniejsza ryzyko pożaru, bez uszczerbku dla innych aspektów bezpieczeństwa.

Łuki w systemach PV

W tych 0,006% systemach, które są narażone na ryzyko wywołania pożaru, pierwotną przyczynę przypisuje się łukom elektrycznym po stronie prądu stałego systemu fotowoltaicznego



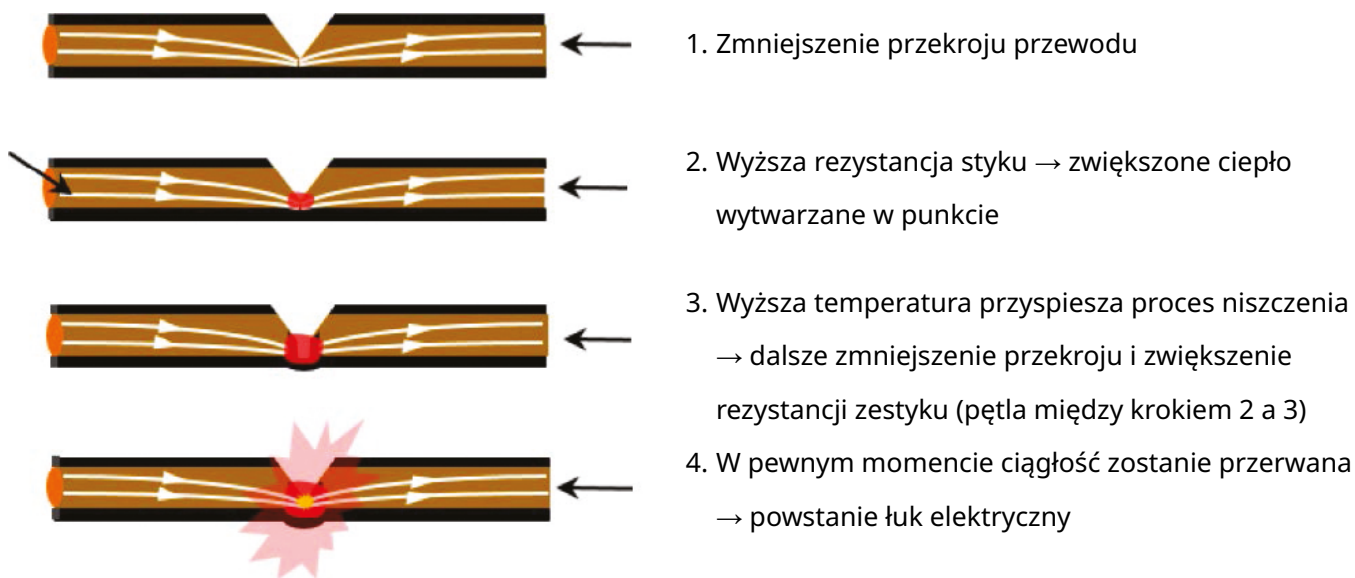
Rysunek 1: Łuki szeregowe (ang. serial arc) i równoległe (ang. paralel arc) w systemach fotowoltaicznych.

Istnieją 2 rodzaje łuków prądu stałego (Rysunek 1):

Łuki równoległe: mogą wystąpić w wyniku uszkodzenia izolacji kabli, co może spowodować zwarcie między DC+ i DC- lub między DC+/DC- a ziemią. Jednak łuki równoległe są bardzo mało prawdopodobne, zwłaszcza w nieziemionych systemach fotowoltaicznych stosowanych w Europie: aby powstał łuk równoległy między 2 kablami prądu stałego, izolacja musi zostać uszkodzona w tym samym miejscu i w tym samym czasie, ponieważ zintegrowany z falownikiem monitoring stanu izolacji wykrywa każde pojedyncze zwarcie do masy.

Łuki szeregowe: związane są z punktami połączeń (np. w skrzynkach przyłączeniowych modułów, złączach prądu stałego, skrzynkach połączeniowych, zaciskach przełączników prądu stałego i falowników itp.). Mogą powstawać w przypadku wadliwego połączenia, które ostatecznie zostaje przerwane. Może to być spowodowane różnymi przyczynami, takimi jak naturalne starzenie się, długotrwałe oddziaływanie warunków atmosferycznych na styki i połączeniach, mechaniczne uszkodzenia złączy, niewłaściwa konserwacja, niewystarczające dokręcenie zacisków śrubowych, zła instalacja złączy DC (np. lub ich niedopasowanie), itp. W tych sytuacjach zmniejsza się powierzchnia styku połączenia, czyli zwiększa się rezystancja styku. Prowadzi to do zwiększonych strat energii, wydzielanie się ciepła, a co za tym idzie wyższej temperatury w złączu, co z kolei przyspiesza proces degradacji (Rysunek 2). Ostatecznie ciągłość przewodnika jest przerwana i powstaje bardzo mała szczelina powietrzna. Jeśli pole elektryczne jest wystarczająco silne ($> 3 \text{ kV/mm}$ [3]), powietrze

ulegnie jonizacji i wytwarza przewodzącą plazmę (co określamy jako łuk elektryczny), umożliwiając przepływ prądu przez szczelinę powietrzną.



Rysunek 2: Proces powstawania łuku w przewodniku [12]

Płonący łuk elektryczny może osiągać temperatury powyżej 10 000 °K [4] – co może spowodować zapalenie znajdujących się w pobliżu materiałów palnych i zainicjować pożar – oraz emituje zarówno światło widzialne, jak i UV.

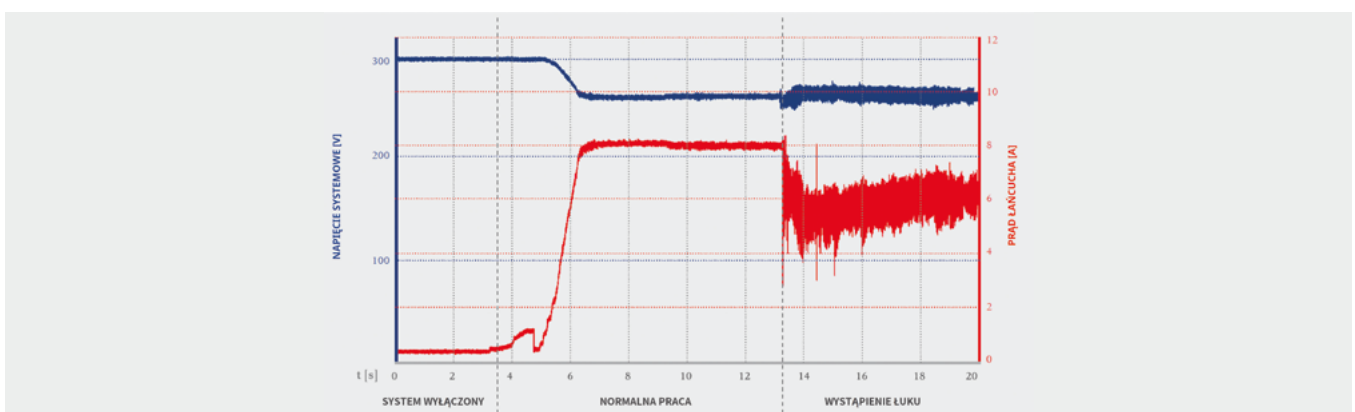
Pierwszym poziomem ochrony przed łukami prądu stałego, który zawsze należy stosować, jest **minimalna liczba punktów połączeń**, czyli minimalizacja ryzyka wystąpienia łuku. Można to uznać za „pasywny” środek ochrony, ponieważ jest to środek nieodłącznie związany ze sposobem projektowania i instalacji systemu [5]. Tylko wtedy, gdy taki środek minimalizacji ryzyka został zastosowany, sensowne jest wdrożenie dodatkowego i „aktywnego” środka ograniczania ryzyka.

Wykrywanie i przerywanie łuku DC w systemach PV

Jeśli chodzi o pierwotną stosunkowo niską przyczynę powstawania pożaru PV, łuki szeregowy mają znacznie większy udział w porównaniu do łuków równoległych, co jest spowodowane dużą liczbą punktów styku szeregowego po stronie DC systemów PV. Dlatego technologie i standardy wykrywania zwarć łukowych koncentrują się na łukach szeregowych. Ponadto detektory łuków AC nie mogą być używane do wykrywania łuków DC ze względu na inną charakterystykę (dla prądów DC napięcie nie przechodzi okresowo przez wartość zero). Dlatego do wykrywania łuków DC potrzebna jest specyficzna technologia.

W ostatniej dekadzie opracowano różnorodne techniki wykrywania i przerywania łuków w systemach fotowoltaicznych [6, 7, 8]. Spektralna detekcja łuku jest najbardziej zaawansowaną i szeroko stosowaną technologią w branży. Jest ona oparta na analizie sygnałów napięcia i prądu wywołanych przez łuk w dziedzinie częstotliwości.

Wystąpienie łuku szeregowego znacząco wpływa na sygnały napięciowe i prądowe systemu fotowoltaicznego (Rysunek 2). Podczas normalnej pracy składowa prądu zmiennego sygnałów w dziedzinie czasu jest bardzo mała, natomiast w przypadku wystąpienia łuku sygnały są bardzo niestabilne, ze szczytami i dużą szybkością zmian. Za pomocą FFT (ang. Fast Fourier Transform - szybka transformata Fouriera) sygnał może zostać przetworzony i przeanalizowany w widmie częstotliwości. W tym przypadku szum wywołany przez łuk można rozpoznać po wyższej amplitudzie składowych częstotliwości, które zwiększają ogólny poziom szumów systemu w porównaniu z normalnymi warunkami bez łuku (Rysunek 3).



Rysunek 3: Sygnał napięcia i prądu w systemie fotowoltaicznym w dziedzinie czasu, przed i podczas łuku.

Podstawowe techniki wykrywania łuku porównują zmierzone wartości sygnału prądowego i napięciowego z określonymi wartościami progowymi, aby określić, czy system znajduje się w stanie wyładowania łukowego, czy też nie.

Jednak określenie, kiedy w systemie dochodzi do tworzenia łuku, nie jest proste i wiąże się z kilkoma wyzwaniami [6, 8], na przykład:

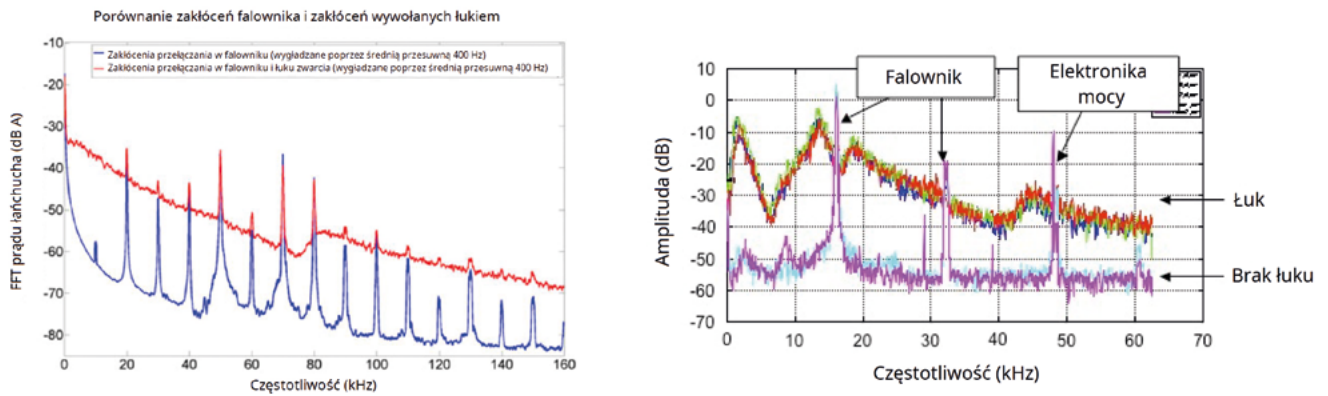
- falownik sam generuje szczyty szumów przy pewnych częstotliwościach (w zależności od falownika), które mogą nakładać się na sygnaturę łuku, jak widać na rysunku 3,
- częstotliwość przełączania innych urządzeń energoelektronicznych, takich jak kontrolery ładowania i przetwornice DC/DC, a także obecność innych urządzeń elektronicznych w obrębie lub w pobliżu generatora fotowoltaicznego, również może powodować dodatkowe zakłócenia,
- długie kable instalacji fotowoltaicznej mogą zachowywać się jak antena, dodając szum w paśmie częstotliwości od 100 kHz do 500 MHz. Kable fotowoltaiczne mogą również działać jak filtr dolnoprzepustowy ze względu na ich element indukcyjny, tłumiąc w ten sposób hałas łuku przy wysokich częstotliwościach, utrudniając wykrycie łuku,
- w przypadku częstotliwości poniżej 1 kHz skoki i wahania prądu, spowodowane na przykład wyłączeniem falownika, regulacją mocy lub warunkami środowiskowymi np. szybko poruszającymi się chmurami lub wibracjami spowodowanymi wiatrem, mogą również wpływać na to, że sygnał prądowy będzie wyglądał jak łuk.

Wszystkie te źródła zakłóceń mogą powodować 2 rodzaje problemów z detekcją zwarć łukowych:

- dodatkowy szum może nakładać się na sygnał łuku („maskowanie”), w którym to przypadku łuk może pozostać niewykryty
- dodatkowy szum może być interpretowany jako rzeczywisty łuk („szum lub fałszywe wyzwolenie”), więc falownik wyłączy się, nawet jeśli łuk elektryczny nie wystąpi, przerywając w ten sposób pracę systemu PV.

Problem maskowania łuku przez czynniki zewnętrzne jest związany z bezpieczeństwem pożarowym, podczas gdy wyzwalanie reakcji na nieistniejący łuk ma wpływ jedynie na wydajność i koszty, ze względu na niepożądane przestoje systemu.

Właściwy i solidny detektor łuku powinien być w stanie sprostać wyżej opisanym wyzwaniom i wykrywać łuki z dużą niezawodnością i dokładnością, jednocześnie minimalizując ryzyko fałszywych wyzwoleń [9].

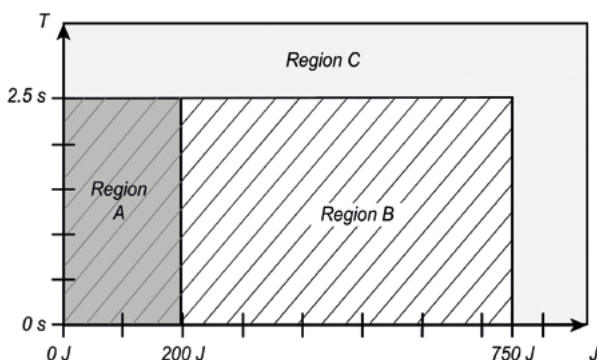


Rysunek 4: Przykłady widma częstotliwości z łukiem (czerwone krzywe) i bez (niebiesko-fioletowe krzywe) [7, 9].

Normy dotyczące ochrony przed zwarciami łukowymi PV

Pierwsza standaryzacja miała miejsce w 2011 roku w USA wraz z UL1699B, który po raz pierwszy wprowadził nazwę „AFCI” (ang. Arc-Fault Circuit Interrupter - przerywacz obwodu zwarcia łukowego), którą powszechnie określa się tą technologię. Wkrótce (na czas pisania tego artykułu) zostanie opublikowana norma IEC 63027, która używa nieco innej terminologii: „AFD” (ang. Arc-Fault Detector) – wykrywacz zwarć łukowych. Jest to rozwiązanie, które monitoruje sygnały prądu zmiennego w okablowaniu prądu stałego i wykrywa łuki, podczas gdy „przerywacz zwarć łukowych” (ang. Arc-Fault Interrupter, AFI) to urządzenie, które faktycznie przerywa obwód po otrzymaniu polecenia z AFD po wykryciu łuku. Połączenie AFD i AFI tworzy tak zwany „AFPE” (ang. Arc-Fault Protection Equipment) – sprzęt ochrony przed zwarciami łukowymi. Może to być oddzielne urządzenie lub zintegrowane z falownikiem.

Norma IEC 63027 wymaga testowania AFPE w różnych warunkach wyładowania łukowego, w tym przy różnych prądach łuku, napięciu obwodu otwartego i napięciu mpp, różnych przerwach łukowych i szybkościach separacji elektrod generatora łuku. Łuk musi zostać wykryty w ciągu 2,5 sekundy lub zanim energia łuku przekroczy 750 J, w zależności od tego, co nastąpi wcześniej (Rysunek 4).



Rysunek 5: Ilustracja z UL1699B wymagań dotyczących czasu i energii, również określonych przez IEC 63027, do wykrywania zwarć łukowych, [10]

Norma dopuszcza również automatyczne ponowne załączenie falownika po wykryciu łuku, pod warunkiem, że nastąpi co najmniej 5-minutowa przerwa w działaniu falownika. Po wykryciu łuku elektrycznego i przerwaniu obwodu system musi wysłać stosowny komunikat o błędzie. Automatyczne ponowne podłączenie jest możliwe maksymalnie 4 razy w ciągu 24 godzin: jeśli piąte wykrycie łuku nastąpi w ciągu 24 godzin, falownik można ponownie uruchomić wyłącznie ręcznie, w miejscu instalacji. Jednak wymóg ten nie obowiązuje, jeśli łuk zgaśnie przed przekroczeniem 200 J i w ciągu 2,5 sekundy (Region A). W takim przypadku nie ma ograniczeń co do tego, ile razy falownik może być automatycznie ponownie załączony.

Jako dodatkowy wymóg wykrywania ewentualnych usterek AFPE musi posiadać funkcję autotestu, która symuluje łuk, który musi zostać wykryty przez AFD, albo alternatywnie symuluje usterkę w AFD, którą funkcja autotestu powinna wykryć. Funkcja autotestu może być automatyczna, w takim przypadku musi być wykonana przed rozpoczęciem pracy i musi być wykonana 1 raz w ciągu 24 godzin.

Fronius Arc Guard

Koncepcja bezpieczeństwa firmy Fronius koncentruje się na 2 poziomach:

- pierwszym i podstawowym poziomem ochrony jest minimalizacja ryzyka (ochrona pasywna). Ryzyko wystąpienia łuków prądu stałego powinno być ograniczone poprzez najlepsze praktyki instalacyjne i konserwacyjne, poprzez minimalizację liczby punktów połączeń i prawidłowe wykonanie wszystkich połączeń. Zmniejsza to liczbę potencjalnych zwarć łukowych, którymi trzeba będzie się zajmować.
- drugi poziom to rzeczywiste wygaszanie łuków (ochrona aktywna). Kiedy liczba możliwych miejsc wystąpienia zwarć łukowych zostanie zredukowana do minimum, system fotowoltaiczny jest bezpieczniejszy dzięki AFPE.

Aby zapewnić drugi poziom ochrony, firma Fronius opracowała najnowocześniejszą technologię wykrywania i przerywania łuku elektrycznego — Fronius Arc Guard.

W swoim rozwoju firma Fronius mogła polegać na rozległym know-how i wieloletnim doświadczeniu w dziedzinie spawania łukowego, które zdobyła w jednostce biznesowej Perfect Welding. W rezultacie powstała solidna technologia oparta na klasycznej detekcji łuku widmowego opartej na algorytmie FFT, a następnie rozwinięta o zaawansowane techniki, takie jak: metody rozpoznawania wzorców i wykorzystanie samouczących się algorytmów w celu ciągłego doskonalenia.

Zwiększone bezpieczeństwo bez kompromisów dzięki Arc Guard

Systemy PV są już bardzo bezpieczne. Statystycznie ponad 99,994% zainstalowanych systemów nie ulegnie pożarowi, więc liczba „bezpiecznych instalacji” jest bardzo wysoka. Oznacza to, że próba podniesienia bezpieczeństwa instalacji może skutkować relatywnie niewielkim jego wzrostem (np. o 0,001%). Dlatego każdy dodatkowy środek bezpieczeństwa powinien być dokładnie przeanalizowany, aby mieć pewność, że uzyskana (niewielka) korzyść nie przyniesie więcej skutków ubocznych, które stawiałyby pod znakiem zapytania zastosowanie takiego środka.

Przykładem jest wykorzystanie energoelektroniki na poziomie modułu (ang. Module Level Power Electronics, MLPE). Ich funkcja wyłączenia ma na celu zwiększenie bezpieczeństwa strażaków, ale jednocześnie rozmieszczenie skrzynek elektronicznych pod każdym modułem PV wprowadzi ogromną ilość złączy DC w instalacji PV. Ryzyko łuków elektrycznych jest więc faktycznie zwiększone, podobnie jak ryzyko pożaru. Wykazano to w IEC TR 63226, raporcie technicznym IEC, który zawiera wytyczne dotyczące zmniejszania ryzyka pożarowego dla systemów fotowoltaicznych na budynkach [11]. Wniosek był jasny: liczbę połączeń należy minimalizować, ponieważ stanowi to podstawową ochronę pierwszego stopnia.

Z drugiej strony dodatkowe bezpieczeństwo zapewniane przez Arc Guard jest osiągnięte dzięki zastosowaniu oprogramowania i sprzętu zintegrowanego z falownikiem, dzięki czemu nie są potrzebne żadne dodatkowe urządzenia zewnętrzne, a w systemie nie są wprowadzane żadne dodatkowe punkty połączeń. Oznacza to również, że klienci końcowi nie ponoszą żadnych dodatkowych kosztów ani nie są konieczne dodatkowe prace instalacyjne.

Ponadto, jako AFPE, Arc Guard opiera się na zasadzie zachowania ostrożności, to znaczy: wykrywa i gasi łuki, zanim zdążą one doprowadzić do pożaru. Kiedy funkcja Arc Guard rozpoznaje „stan łuku”, moduły mocy inwertera przerywają pracę i wstrzymują wprowadzanie energii do sieci. W ten sposób przepływ prądu zostaje przerwany, a łuk gaśnie.

Ponieważ Arc Guard dodatkowo zmniejsza prawdopodobieństwo pożaru, jest to również najlepsza ochrona dla ratowników, ponieważ brak pożaru oznacza brak ryzyka dla strażaków.

Bibliografia

- [1] Fraunhofer ISE „Recent Facts about Photovoltaics in Germany“, Fraunhofer ISE, Division Photovoltaic Modules, Systems and Reliability, Freiburg, 2021.
- [2] BRE National Solar Centre, „Fire and Solar PV Systems – Investigations and Evidence“, 2017.
- [3] IEC TR 63226, „Managing fire risk related to photovoltaic (PV) systems on buildings“, 2021.
- [4] Shibo Lu, et al., „Study on DC Series Arc Fault in Photovoltaic Systems for Condition Monitoring Purpose“, in Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2017.
- [5] TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, „Assessment of the fire risk in PV-arrays and development of security concepts for risk minimization“, Köln, 2015.
- [6] L. E. Norum and F. Schimpf, „Recognition of electric arcing in the DC-wiring of photovoltaic systems“, in INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference, 2009.
- [7] Shibo Lu, et al., „A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, pp. 88-89, 2018.
- [8] M. K. Alam, et al., „A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques“, IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, vol. 5, no. 3, pp. 982-997, 2015.
- [9] G. Artale, et al., „DC series arc faults in PV systems. Detection methods and experimental characterization“, in 22nd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing, 2020.
- [10] NREL, National Renewable Energy Laboratory, „Low Cost Arc Fault Detection and Protection for PV Systems“, 2013.
- [11] UL 1699B: 2018, „Standard for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection“.
- [12] K. Yang, et al., „A Novel Arc Fault Detector for Early Detection of Electrical Fires“, Sensors, vol. 16, no. 4, p. 500, 2016.

