

# OFICJALNY DOKUMENT BEZPIECZEŃSTWA

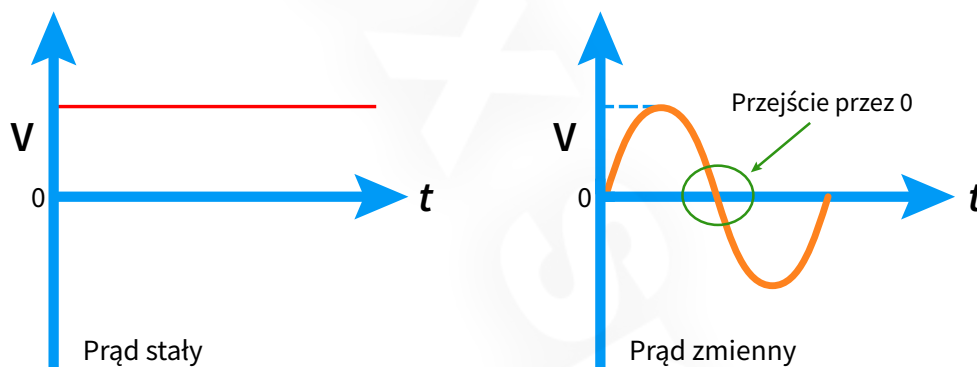
Styczeń 2020

Prawdziwym punktem robiącym różnicę w architekturze Enphase Energy jest bezpieczeństwo. Właściciele domów i instalatorzy na całym świecie są zainteresowani bezpieczeństwem bardziej niż czymkolwiek innym, a Enphase ma jedną z najbezpieczniejszych architektur falowników w branży. Aby lepiej zrozumieć architekturę Enphase, zacznijmy od podstaw.

## AC vs DC

Prąd elektryczny to przepływ elektronów w przewodniku. Ogólnie można podzielić go na prąd stały (DC) i prąd przemienny (AC). W przypadku prądu stałego (DC) ładunek elektryczny (prąd) płynie tylko w jednym kierunku. W przypadku prądu przemiennego (AC) kierunek przepływu ładunku elektrycznego zmienia się okresowo.

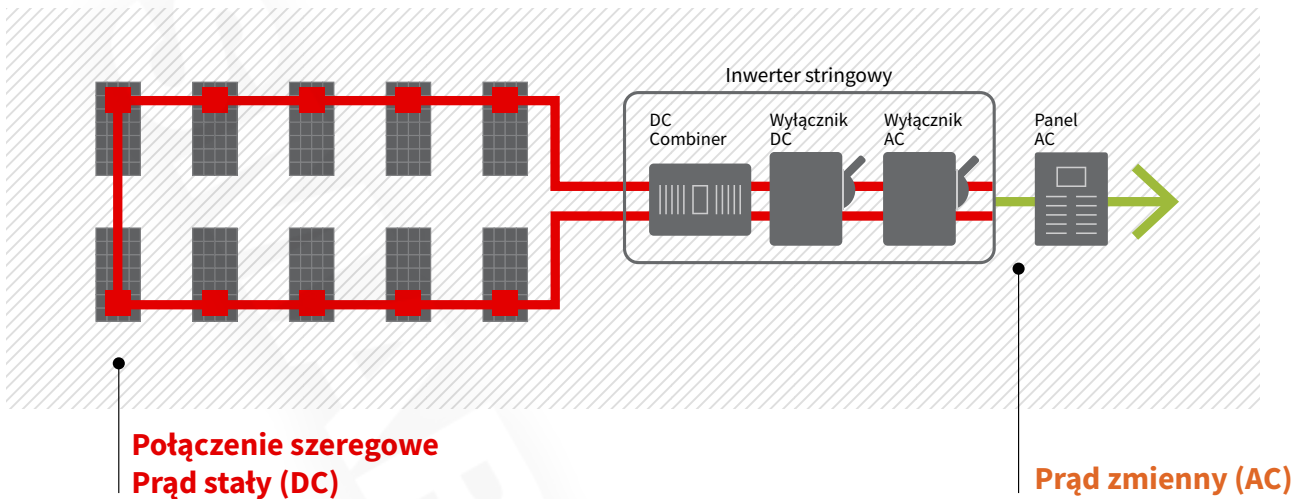
Z rysunku 1 poniżej wynika, że prąd stały wymaga stałego napięcia, aby przemieszczać elektrony (określane jako przepływ prądu). Z drugiej strony prąd przemienny jest przenoszony przez napięcie, które oscyluje między wartościami maksymalnymi i minimalnymi. W przypadku prądu przemiennego napięcie dwukrotnie przekracza punkt zerowy w każdym cyklu. Jest to krytyczne, ponieważ w momencie, gdy napięcie wynosi zero, nie ma prądu. W systemie prądu stałego prąd nigdy nie spada do zera. Jest to szczególnie problematyczne, gdy występuje awaria lub przerwa w systemie izolacji DC, co sprawia, że bezpieczeństwo jest zagrożone. Wkrótce do tego dojdziemy.



Rysunek 1. Reprezentacja prądu stałego i zmiennego

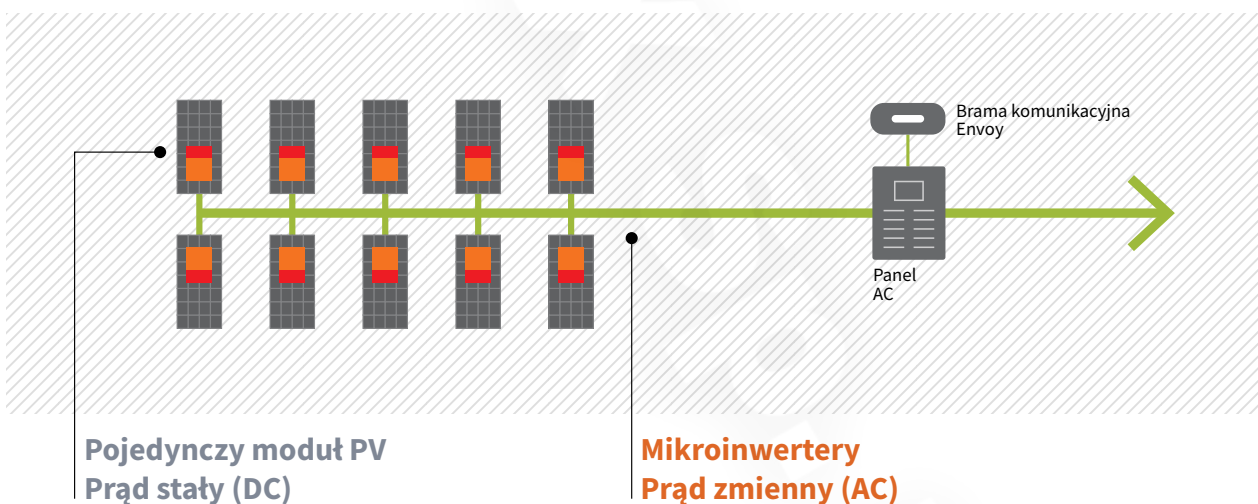
Wiele problemów związanych z bezpieczeństwem instalacji fotowoltaicznych dotyczy przede wszystkim napięcia i prądu stałego. Przy niskim poziomie napięcia są względnie nieszkodliwe. Jednak wraz ze wzrostem poziomu napięcia stałego rośnie ryzyko szkód z tym związanych, czasami prowadzących nawet do niebezpiecznych pożarów.

W przypadku tradycyjnych falowników stringowych panele fotowoltaiczne (niezależnie od tego, czy zostały wyposażone w optymalizatory) są połączone szeregowo (patrz rysunek 2). Każdy panel podłączony szeregowo zwiększa napięcie prądu stałego w obwodzie. W instalacjach domowych może występować napięcie prądu stałego rzędu 600 woltów, a w instalacjach komercyjnych nawet 1000 woltów. Nawet małe systemy PV mogą generować około 350–400 woltów napięcia prądu stałego w obwodzie. Wszystko to może być potencjalnie bardzo niebezpieczne nie tylko dla właścicieli domów, ale także dla ekip instalujących i obsługujących takie systemy PV.



Rysunek 2. Typowa instalacja PV z inwerterem stringowym

W odróżnieniu od tradycyjnych instalacji, w systemach Enphase nie występuje wysokie napięcie prądu stałego. Każdy panel ma pod sobą mikroinwerter, który przekształca prąd stały na prąd zmienny na poziomie modułu, dlatego napięcie prądu stałego pozostaje niskie (patrz rysunek 3). Pozostała część instalacji pracuje w trybie prądu zmiennego (AC).

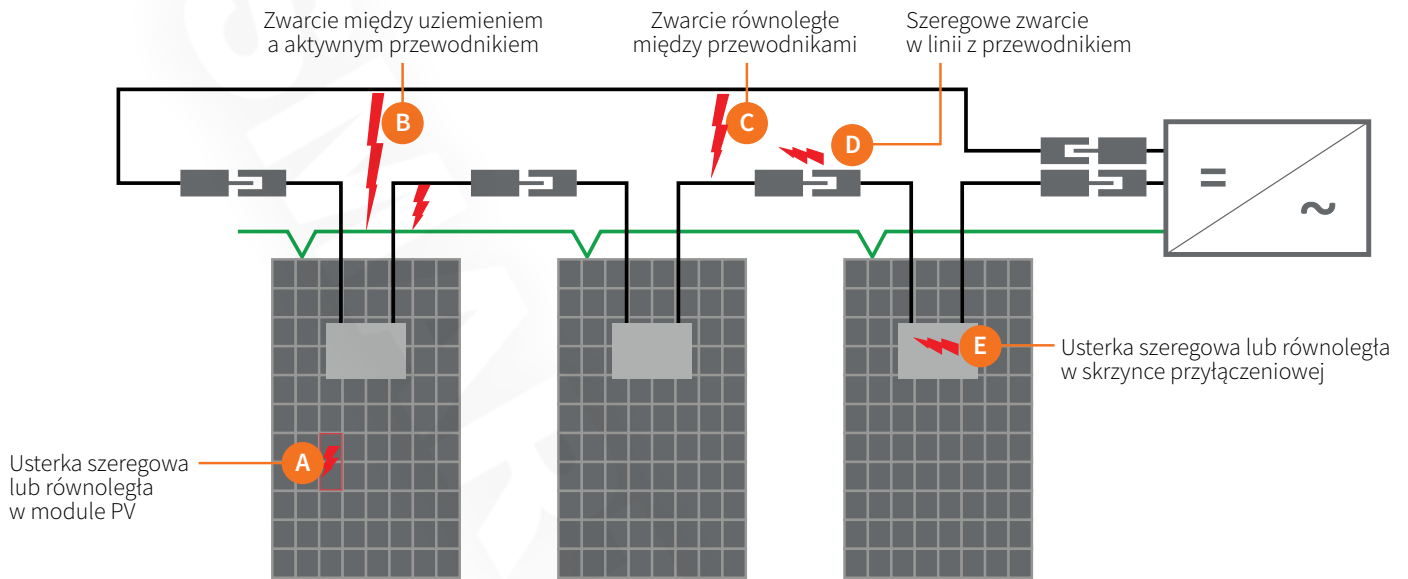


Rysunek 3. Instalacja z mikroinwerterami Enphase

## Awarie łuku DC

Zwarcie łuku DC to przepływ energii elektrycznej przez szczelinę powietrzną za pomocą zjonizowanych cząsteczek gazu. Powietrze jest zwykle uważane za ośrodek nieprzewodzący, ale wysoka różnica potencjałów (napięcie) między dwoma przewodnikami (np.: uszkodzenie przewodu z powodu luźnych połączeń przewodów) w bezpośredniej bliskości może spowodować rozpad cząsteczek powietrza na ich zjonizowane składniki (zwane „plazmą”), które mogą przenosić ładunek z jednego przewodu na drugi. Ten przepływ ładunków (elektronów), gdy jest podtrzymany, powoduje powstanie jasnego łuku, który wytwarza ciepło, niszcząc izolację przewodu i wywołując pożar.

Różne rodzaje zwarć łukowych w instalacjach PV z inwerterem stringowym pokazano na rysunku 4. Najważniejszym i najczęstszym typem awarii jest typ D (zwarcie szeregowe w linii z przewodnikiem).



Rysunek 4. Różne typy zwarcia łukowego DC w typowym systemie PV z inwerterem stringowym

**Tutaj** możesz obejrzeć demonstrację zwarcia łukowego. Odstęp między dwoma przewodami przewodzącymi wynosi odpowiednio około  $\frac{1}{2}$  do  $\frac{3}{4}$  cala, przy około 280 VDC. Łuk w tym punkcie jest wystarczająco gorący, aby stopić wolfram! Zasadniczo spawasz. To pokazuje, jak niebezpieczne może być posiadanie systemu wysokiego napięcia DC na dachu.

W drugiej części demonstracji napięcie zwarcia łukowego wynosi około 35 VDC przy dużo, DUŻO mniejszej przerwie. Słaby łuk nie podtrzyma się. Spróbujmy szczegółowo wyjaśnić te dwa zjawiska.

Po podłączeniu do mikroinwerterów system fotowoltaiczny jest z natury znacznie bezpieczniejszy niż system oparty na falowniku centralnym obsługującym wysokie napięcia prądu stałego. W przypadku pojawienia się łuku szeregowego w okablowaniu prądu stałego elementy takie jak właściwa charakterystyka panelu fotowoltaicznego, pojemność wejściowa prądu stałego mikroinwertera i zachowanie algorytmu MPPT, odgrywają dużą rolę w łagodzeniu łuku. Te trzy elementy oddziałują automatycznie prawie natychmiast powodując, że łuk szeregowy ulega samowygaszeniu już podczas formowania. Spójrzmy na każdy z tych elementów i sposób w jaki ze sobą współdziałają.

## Krzywa I-V panelu fotowoltaicznego

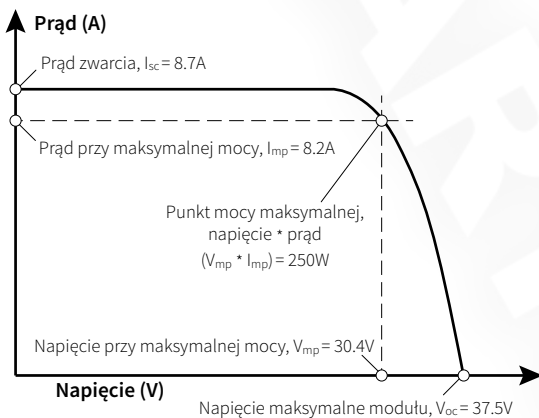
Charakterystyka pracy wszystkich paneli fotowoltaicznych jest określona przez ich charakterystyczną krzywą I-V. (patrz rysunek 5). Dla danego poziomu natężenia napromienienia i temperatury roboczej napięcie i prąd panelu zawsze będą na tej krzywej I-V. Punkty końcowe tej krzywej określają maksymalny prąd ( $I_{sc}$ ) i maksymalne napięcie ( $V_{oc}$ ), jakie moduł PV może wytworzyć. Prawo Ohma definiuje moc jako napięcie pomnożone przez prąd ( $P = V \times I$ ). Ponieważ moc wyjściowa panelu fotowoltaicznego jest zgodna z krzywą I-V, istnieje optymalne napięcie ( $V_{mp}$ ) i optymalny prąd ( $I_{mp}$ ) na krzywej I-V, gdzie moc wyjściowa panelu jest maksymalna.

## MPPT

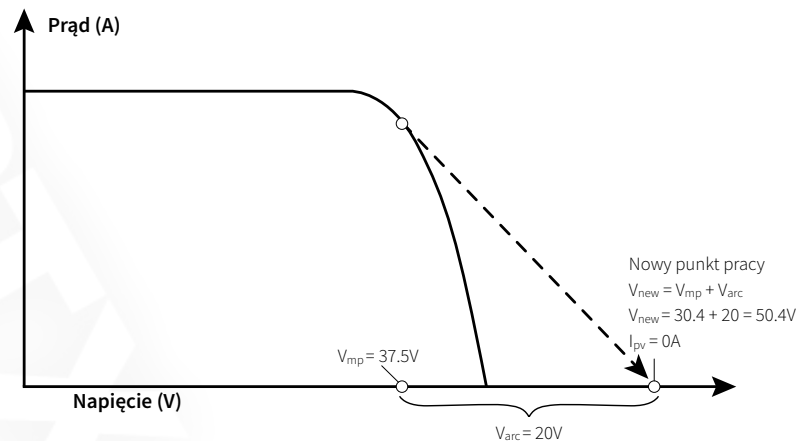
Podczas pracy mikroinwerter nieustannie mierzy napięcie i prąd modułu PV oraz dostosowuje swoją moc wyjściową tak, aby utrzymać pracę modułu w punkcie jego maksymalnej mocy. Ta funkcja jest znana jako śledzenie punktu maksymalnej mocy (*maximum power point tracking*) lub MPPT. W praktyce oznacza to, że panel fotowoltaiczny znajduje się w punkcie maksymalnej mocy przy każdym uruchomieniu mikroinwertera. Ponieważ pojemność wejściowa mikroinwertera jest równoległa do panelu fotowoltaicznego, pojemność ta również znajduje się w punkcie optymalnego napięcia ( $V_{mp}$ ) i maksymalnej mocy.

## Pojemność wejściowa mikroinwertera

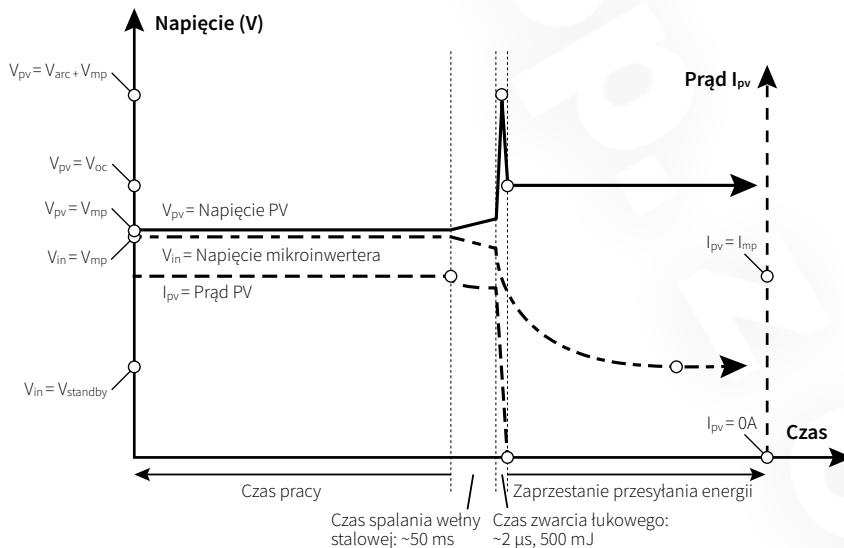
Wszystkie mikroinwertery Enphase mają stosunkowo duże pojemności wejściowe, które stabilizują napięcie paneli fotowoltaicznych w punkcie maksymalnej mocy. Gdy powstaje łuk szeregowy, powstaje napięcie chwilowe od 20 do 40 woltów szeregowo do napięcia na pojemności wejściowej. Ponieważ pojemność wejściowa jest znacznie większa niż pojemność modułu PV, napięcie wejściowe prądu stałego mikroinwertera nie zmienia się w miarę powstawania łuku. Utworzenie łuku wymaga zatem zwiększenia napięcia modułu o 20 do 40 woltów, aby podtrzymać łuk. To zsumowane napięcie zwiększone o napięcie łuku leży powyżej napięcia maksymalnego modułu PV ( $V_{oc}$ ). Zatem panel nie może wytwarzać prądu przy takim napięciu. W rezultacie łuk sam się gasi, gdy tylko zaczyna się formować, co znacznie zmniejsza ryzyko pożaru.



Rysunek 5. Krzywa I-V modułu PV



Rysunek 6. W przypadku zwarcia łukowego połączonego szeregowo z działającym mikroinwerterem napięcie wzrasta do  $V_{mp} + V_{arc}$ . Charakterystyka modułu PV powoduje, że natężenie prądu spada do zera. Przy zerowym prądzie MPPT (śledzenie punktu maksymalnej mocy) przestaje działać i mikroinwerter wyłącza się.



Rysunek 7. Krzywe I-V wyjaśniające zachowanie mikroinwertera podczas zwarcia łukowego

Aby łuk mógł się utrzymać, to równanie musi być prawdziwe:  $V_{oc} > V_{arc} + V_{mp}$ . W systemie z jednym modulem  $V_{mp} + V_{arc}$  jest większe niż  $V_{oc}$ , zatem łuk nie może istnieć. W przypadku dwóch modułów połączonych szeregowo równanie może być prawdziwe w zależności od temperatury i współczynnika wypełnienia modułu, tj. kształtu krzywej I-V. W przypadku trzech lub więcej modułów połączonych szeregowo  $V_{arc} + V_{mp}$  zawsze będzie mniejsze niż  $V_{oc}$ . Dlatego instalacje z inwerterem stringowym są w stanie podtrzymywać zwarcie łukowe.

Spróbujmy zrozumieć to zjawisko w systemach z inwerterem stringowym w sposób mniej matematyczny. Po utworzeniu łuku jego siła zależy od natężenia prądu. Ponieważ całkowite napięcie prądu stałego w połączeniu szeregowym jest wysokie (około 600 do 1000 woltów), napięcie łuku od 20 do 40 woltów w szeregu nie powoduje znaczącej zmiany napięcia całego stringa. Oznacza to, że moduły PV nadal będą dostarczać prąd, który jest niezbędny do podtrzymania łuku. W rezultacie łuk nie gaśnie i konieczne jest podjęcie innych środków, aby zmniejszyć ryzyko zwarcia łukowych.

Ponieważ systemy mikroinwerterowe Enphase zawsze działają na niższych poziomach napięcia stałego, nie jest konieczne dodawanie zewnętrznego urządzenia DC AFCI (przerywacz obwodu zwarciego) do instalacji fotowoltaicznej. Charakterystyka mikroinwerterów sprawia, że jest to znacznie bezpieczniejsza technologia inwerterowa.

## Awarie łuku AC

W przypadku prądu stałego jego przepływ jest ciągły i nigdy nie spada do zera. W przypadku prądu zmiennego sytuacja wygląda inaczej. Jego przepływ zmienia się przecinając zero raz na pół cyklu, co z natury rzeczy znacznie obniża ryzyko wystąpienia zwarcia łukowych. Dlatego nie jest konieczne dodawanie urządzeń AC AFCI (przerywacz obwodu zwarcia łukowych) do instalacji PV opartych o mikroinwertery Enphase. Ponadto zamiana energii fotowoltaicznej na prąd zmienny na poziomie modułu zmniejsza długość okablowania prądu stałego, a tym samym ryzyko wystąpienia zwarcia łukowych.

## Porażenie prądem

Charakter prądu stałego powoduje, że podczas rzeczywistego porażenia ma tendencję do „trzymania cię i przyciągania”, podczas gdy prąd zmienny ma tendencję do „odpychania”, ze względu na jego przemienny charakter. Domy są podłączone do prądu zmiennego, a nie prądu stałego z wielu powodów, a jednym z największych jest bezpieczeństwo.

## Szybkie wyłączenie

Celem wymogu funkcji szybkiego wyłączenia jest poprawa bezpieczeństwa strażaków podczas gaszenia pożarów budynków z instalacjami PV. Zadanie polega na zapewnieniu straży pożarnej prostej metody odłączenia przewodów DC systemu PV, aby zapewnić bezpieczeństwo na dachu budynku podczas pożaru. Wynika to z faktu, że w standardowym systemie fotowoltaicznym z falownikiem stringowym, gdy falownik jest wyłączony, okablowanie prądu stałego biegnące od paneli PV do falownika pozostaje aktywne, dopóki świeci słońce i moduły produkują energię.

Jak szczegółowo opisano wcześniej, instalacje fotowoltaiczne z mikroinwerterami Enphase mają jeden inwerter interaktywny bezpośrednio pod każdym modułem PV, przekształcając prąd stały (DC) o niskim napięciu w prąd przemienny (AC) zgodny z siecią elektroenergetyczną. Gdy sieć ta jest dostępna, a słońce świeci, każdy mikroinwerter sprawdza, czy działa ona w ramach wymagań dotyczących połączenia sieci (np. : IEEE 1547). Dopiero wtedy przesyła prąd zmienny do sieci elektrycznej w celu zasilenia urządzeń w miejscu instalacji lub przesyła energię do sieci energetycznej. Kiedy wystąpi awaria sieci energetycznej lub obwodu prądu zmiennego systemu fotowoltaicznego zostaną od niej odłączone za pomocą bezpiecznika, mikroinwertery przestają wytwarzać prąd przemienny w ciągu kilku jego cykli. Mikroinwertery Enphase (seria IQ7TM, seria IQ6TM, seria M, seria S i seria C) nie mogą działać jako źródło napięcia zmiennego. Oznacza to, że bez źródła zasilania prądem zmiennym nie są w stanie zasilić podłączonego okablowania, a do obwodów wyjściowych mikroinwertera ani do sieci nie zostanie wprowadzone żadne napięcie ani prąd.

Co więcej, inwertery stringowe wymagają dodatkowego sprzętu, aby osiągnąć zgodność z funkcją szybkiego wyłączenia - wyspecjalizowane skrzynki elektryczne szybkiego wyłączenia instalowane na dachu w odległości ok. 30cm od paneli PV. Przetątnik szybkiego wyłączenia musi być dostępny dla osób udzielających pierwszej pomocy (strażaków) na ziemi. Dlatego należy przewidzieć również okablowanie do sterowania montowanymi na dachu urządzeniami szybkiego wyłączenia. Cały ten dodatkowy sprzęt i okablowanie oznacza dodatkowy czas instalacji i dodatkowe koszty. Ale co najważniejsze, każdy z elementów potrzebnych do systemu szybkiego wyłączenia jest potencjalnym punktem awarii. W efekcie, w celu zapewnienia bezpieczeństwa systemu, otrzymujemy wiele pojedynczych, zależnych od siebie, punktów awarii. Czy te mechanizmy za każdym razem są instalowane poprawnie? Czy kiedykolwiek zawodzą? Wystarczy, że zawiodą jeden raz.

W niektórych inwerterach stringowych z optymizatorami obwody DC nazywane są „Bezpiecznym DC”. Po zainicjowaniu szybkiego wyłączenia (z powodu uszkodzenia przewodu, wyłączenia lub awarii falownika), każdy optymizator przekazuje na wyjście napięcie prądu stałego w wysokości 1 wolta. Jednak w przypadku awarii takiego optymizatora może on przepuścić napięcie prądu stałego z modułu PV, a nawet gorzej, w przypadku awarii wielu optymizatorów może dojść do przepięcia napięcia prądu stałego z wielu paneli fotowoltaicznych i potencjalnego porażenia dla każdego, kto pracuje na dachu - instalatora lub właściciela domu, szczególnie w momencie, gdy ta osoba uważa, że instalacja jest wyłączona.

W niektórych regionach przepisy wyraźnie wymagają, aby urządzenia inicjujące procedurę szybkiego wyłączenia zatrzymywały pracę urządzeń produkujących energię (PCU). W przypadku mikroinwerterów Enphase, bezpieczniki w głównej skrzynce przyłączeniowej (łącznie mikroinwertery z tablicą rozdzielczą) lub bezpieczniki łączone działają jako urządzenia inicjujące.

Najważniejsze jest to, że w systemie mikroinwerterowym Enphase, gdy źródło zasilania prądem przemiennym jest usuwane z obwodów wyjściowych mikrofalownika za pomocą dowolnych środków, bezpiecznik lub wyłącznik AC, mikroinwerter wykonuje funkcję szybkiego wyłączenia. W przypadku mikroinwerterów Enphase to wyłączenie następuje w ciągu kilku sekund, a ponieważ wszystkie mikrofalowniki znajdują się pod panelami PV, nie ma innych przewodów pod napięciem rozciągających się we wszystkich kierunkach na więcej niż 30cm od nich, w tym wewnątrz budynku. Dlatego też systemy mikroinwerterowe Enphase z natury spełniają wymóg szybkiego wyłączenia bez konieczności instalowania dodatkowego sprzętu elektrycznego.