

# WHITEPAPER

# VEILIGHEID

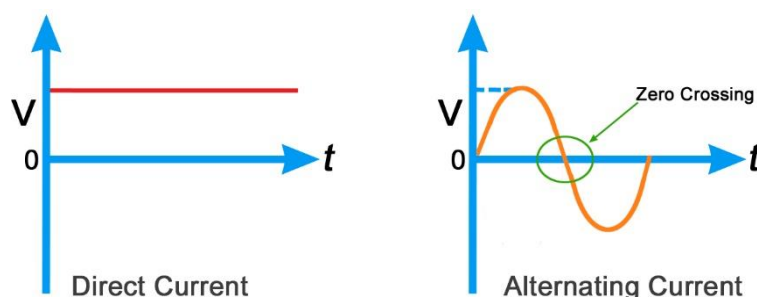
Januari 2020

Een werkelijk onderscheidend punt van de Enphase Energy-architectuur is veiligheid. Zowel huiseigenaren als installateurs, wereldwijd, zijn meer geïnteresseerd in veiligheid dan in wat dan ook en Enphase heeft een van de veiligste architecturen van omvormers in de sector. Laten we beginnen met de basis om meer inzicht te krijgen in de architectuur van Enphase.

### AC ten opzichte van DC

Elektrische stroom is de elektronenstroom in een kabel en deze stroom kan over het algemeen worden onderverdeeld in gelijkstroom (DC) en wisselstroom (AC). Bij DC stroomt de elektrische lading (stroom) in slechts een richting. Bij AC verandert de elektrische lading periodiek van richting.

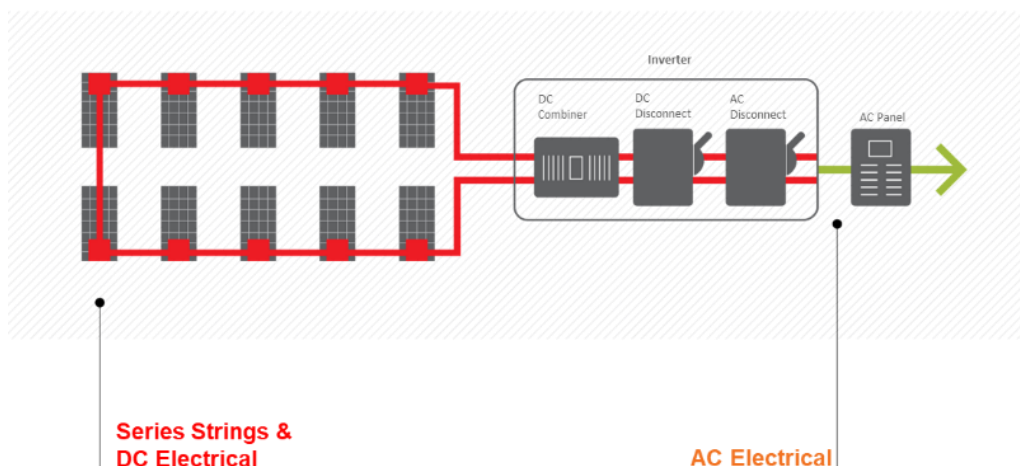
In Figuur 1 hieronder kunt u zien dat DC een constante spanning nodig heeft om de elektronen te verplaatsen (ook wel stroomtoevoer genoemd). Aan de andere kant wordt AC voortbewogen door een spanning die schommelt tussen maximale en minimale waarden. Het is te zien dat bij AC de spanning het nulpunt in elke cyclus twee keer doorkruist. Dit is van belang omdat er geen stroom is op het moment dat de spanning nul is. Met een DC-systeem komt de stroom nooit op het nulpunt. Dit is met name problematisch wanneer er een defect of breuk in een DC-isolatiesysteem optreedt en de veiligheid in gevaar wordt gebracht. Op dit punt komen we snel terug.



Figuur 1: Weergave van DC en AC

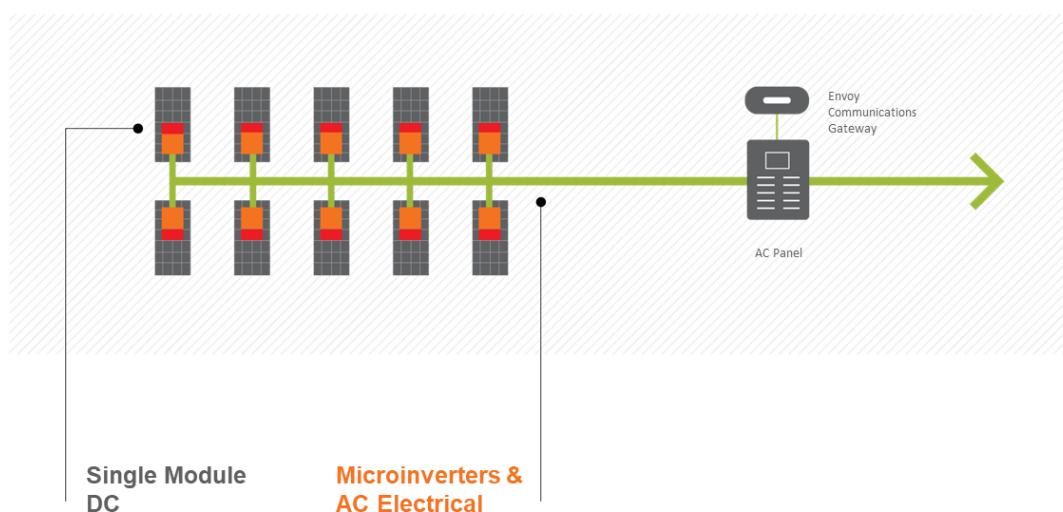
Veel veiligheidskwesties ten aanzien van zonne-energie zijn hoofdzakelijk gerelateerd aan de DC-spanning en stroom. Op lage spanningsniveaus is dit relatief ongevaarlijk. Wanneer het DC-spanningsniveau echter toeneemt, wordt ook het geassocieerde risico op schade verhoogd en dit kan zelfs leiden tot gevaarlijke branden.

Bij de ouderwetse stringomvormers zijn de PV-panelen (al dan niet met onderliggende optimizers) verbonden in een reeks configuraties (zie Figuur 2). Elk paneel dat wordt toegevoegd aan het seriecircuit verhoogt de DC-spanning in dat circuit. Residentiële systemen kunnen 600 volt DC op het dak hebben en bij commerciële systemen kan dit zelfs oplopen tot 1000 volt DC. Zelfs kleine systemen kunnen ongeveer 350-400 volt in het circuit bevatten. Dit kan allemaal bijzonder gevaarlijk zijn, niet alleen voor huiseigenaren, maar ook voor de installateurs die de systemen installeren en onderhouden.



Figuur 2: Weergave van een typisch stringomvormerssysteem

Daarentegen bevatten de Enphase-systemen geen DC met hoge spanning. Onder elk individueel paneel is een micro-omvormer geïnstalleerd. De DC wordt door de micro-omvormer op paneelniveau geconverteerd naar AC en daardoor blijft de DC-spanning laag. Zie Figuur 3. Het rest van het systeem opereert vervolgens in het AC-domein.

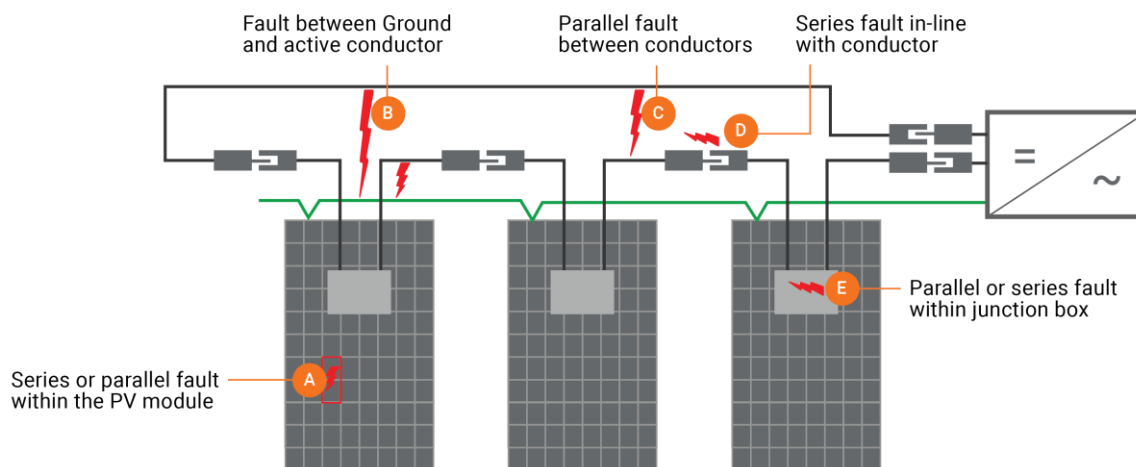


Figuur 3: Weergave van een Enphase micro-omvormerssysteem

### DC-vlamboog

Een vlamboog is de stroom van elektrische energie door een luchtspleet door middel van geïoniseerde gasmoleculen. Lucht wordt gewoonlijk beschouwd als een niet-geleidend medium maar een hoog potentieel verschil (spanning) tussen twee geleiders (bv. storing in de kabel door losse kabelverbindingen) in de directe nabijheid kunnen ervoor zorgen dat de lucht moleculen afbreken in hun geïoniseerde bestanddelen (een “plasma” genoemd) die vervolgens een lading kunnen overbrengen van de ene geleider naar de andere. Deze stroom met lading (elektronen) resulteert, wanneer dit aanhoudt, in een heldere boog die warmte genereert, de isolatie van de kabel afbreekt en een elektrische brand aanwakkert.

De verschillende mogelijkheden van een vlamboog in een zonne-energiesysteem op basis van stringomvormers worden gemarkeerd in Figuur 4. De belangrijkste en meest voorkomende storing is D (storing van de reeks in lijn met de geleider).



Figuur 4: Verschillende mogelijkheden van een vlamboog in een typisch stringvormerssysteem.

Bekijk [hier](#) de demonstratie van een vlamboog in de video. De spleet tussen de twee geleidende kabels is in het eerste deel ongeveer 1,25 tot 1,90 cm, op ongeveer 280 V<sub>DC</sub>. De boog is op dit punt heet genoeg om wolfram te smelten! U bent in feite aan het lassen. Dit laat zien hoe gevaarlijk het kan zijn om een DC-systeem met hoge spanning op uw dak te hebben.

In het tweede deel van de video is de demonstratie van de vlamboog ongeveer 35 V<sub>DC</sub> in een VEEL kleinere spleet. De zwakke boog kan zichzelf niet in stand houden. Laten we een gedetailleerd inzicht krijgen in de twee gedragingen.

Wanneer het PV-systeem is verbonden met micro-omvormers is het per definitie veel veiliger dan een systeem op basis van stringvormers met hoge DC-spanningen. Wanneer een boog optreedt in de reeks van de DC-kabels spelen de inherente eigenschappen van het PV-paneel, de DC-ingangscapaciteit van de micro-omvormer en het gedrag van het MPPT-algoritme allemaal een grote rol in het matigen van de boog. Deze drie elementen reageren automatisch en vrijwel meteen op elkaar waardoor een boog in de reeks in principe vanzelf wordt gedoofd wanneer deze wordt gevormd. Laten we eens kijken naar elk element en hoe deze op elkaar reageren.

### *I-V-curve van het PV-paneel*

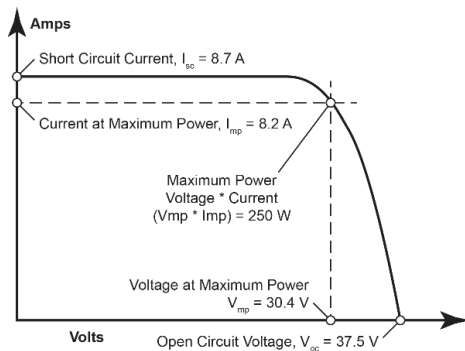
De elektrisch opererende envelop van alle PV-panelen wordt gedefinieerd door de karakteristieke I-V-curve. Zie Figuur 5. Voor een bepaald bestralingsniveau en bedrijfstemperatuur, bevinden de spanning en de stroom van het paneel zich altijd op deze I-V-curve. De eindpunten van de I-V-curve bepalen de maximale stroom ( $I_{sc}$ ) en de maximale spanning ( $V_{oc}$ ) die het PV-paneel kan produceren. De wet van Ohm definieert vermogen als spanning vermenigvuldigd met stroom ( $P = I \times V$ ). Omdat de uitvoer van het PV-paneel een I-V-curve volgt, is er optimale spanning ( $V_{mp}$ ) en optimale stroom ( $I_{mp}$ ) op de I-V-curve waar de uitvoer van het paneel maximaal is.

### *MPPT*

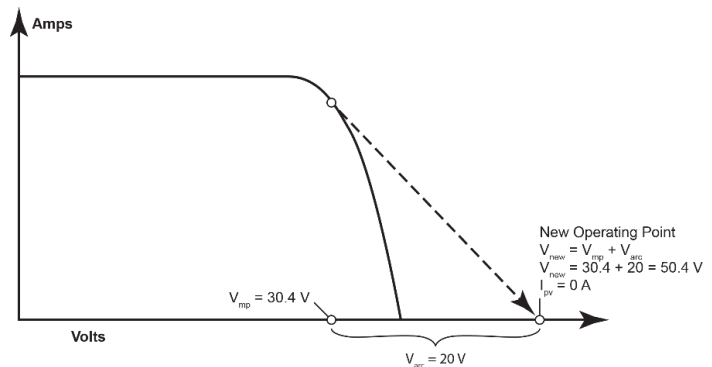
Wanneer de micro-omvormer in bedrijf is, meet deze voortdurend de spanning en de stroom van het PV-paneel en wordt het uitvoervermogen van de micro-omvormer aangepast om het paneel op het maximale vermogenspunt van het werkpunt te houden. Deze functie staat bekend als het traceren van het maximale vermogenspunt of MPPT. In de praktijk betekent dit dat het PV-paneel altijd op het maximale vermogenspunt is ingesteld wanneer de micro-omvormer in werking is. Omdat de ingangscapaciteit van de micro-omvormer parallel loopt met het PV-paneel, is deze capaciteit ook ingesteld op de maximale spanning van het vermogenspunt ( $V_{mp}$ ).

### Ingangscapaciteit van de micro-omvormer

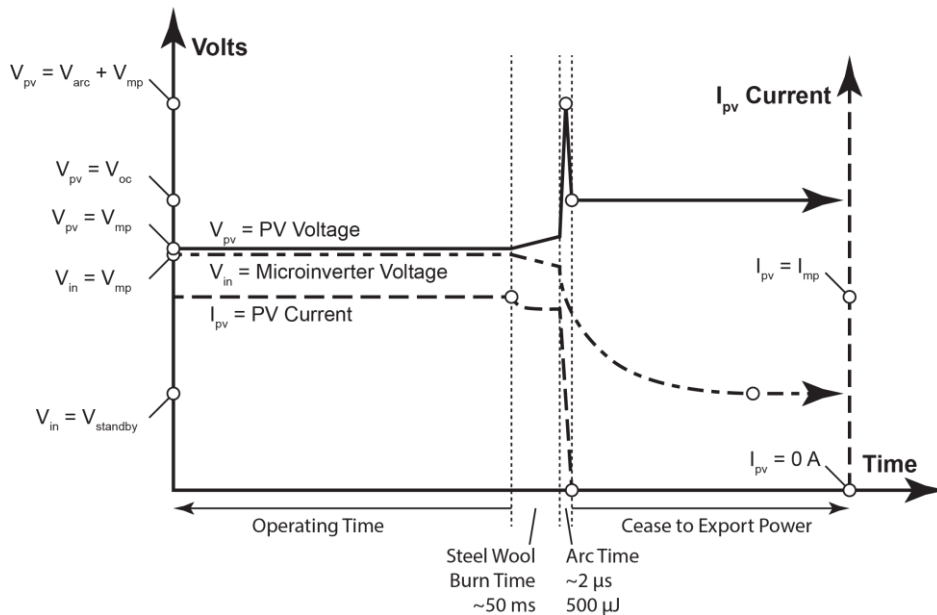
Alle Enphase-micro-omvormers hebben een relatief hoge ingangscapaciteit die fungeert als stabilisator van de spanning van het PV-paneel op het maximale vermogenspunt. Wanneer een boog in de reeks wordt gevormd, wordt onmiddellijk een spanning van 20 tot 40 volt gecreëerd, in serie geschakeld met de spanning op de ingangscapaciteit. Omdat de ingangscapaciteit veel hoger is dan de capaciteit van het paneel, blijft de DC-ingangsspanning van de micro-omvormer in feite constant als de boog zich vormt. Voor de formatie van de boog is daarom een verhoging van de paneelspanning nodig van 20 tot 40 volt om de boog te behouden. Deze gecombineerde condensatorspanning plus de boogspanning ligt boven de spanning van het open circuit van het paneel ( $V_{oc}$ ). Daardoor is het niet mogelijk dat het paneel stroom produceert op deze spanning. Als gevolg daarvan dooft de boog zichzelf uit zodra deze wordt gevormd, waardoor het risico op brand in hoge mate wordt vermindert.



Figuur 5: I-V-curve van een zonnepaneel



Figuur 6: Met een vlamboog in serie geschakeld met een werkende micro-omvormer, stijgt de spanning naar  $V_{mp} + V_{arc}$ . Het overdrachtskenmerk van het PV-paneel dwingt de stroom tot nul. Met nul stroom komt de micro-omvormer onder MPPT (traceren maximale vermogenspunt) en schakelt uit.



Figuur 7: I-V-curve geeft een toelichting op het gedrag van een micro-omvormer tijdens een vlamboog.

Om een boog te behouden, moet deze vergelijking gelden:  $V_{oc} > V_{arc} + V_{mp}$ . Voor een enkel modulesysteem is  $V_{mp} + V_{arc}$  groter dan  $V_{oc}$ . De boog kan daarom niet bestaan. Voor twee modules in een serie kan de vergelijking gelden, afhankelijk van de temperatuur en de vulfactor van de module, zoals de vorm van de I-V-curve. Voor drie of meer in serie geschakelde modules is  $V_{arc} + V_{mp}$  minder dan  $V_{oc}$ . Daardoor wordt de string in staat om de boog te behouden.

Laten we proberen dit fenomeen in stringomvormerssystemen te begrijpen op een niet-wiskundige manier. Zodra de boog wordt gevormd, is de kracht van de boog afhankelijk van de stroom. Omdat de totale DC-spanning in een string hoog is (ongeveer 600 tot 1000 volt DC), zorgt de boogspanning van 20 tot 40 volt in de reeks niet voor een aanzienlijke verandering in de stringspanning. Dit betekent dat de PV-panelen de stroom blijven aanvoeren die noodzakelijk is om de boog te behouden. Als gevolg daarvan zal de boog niet vanzelf uitdoven en worden andere middelen noodzakelijk om de gevaren van een vlamboog te verminderen.

Omdat de micro-omvormerssystemen van Enphase altijd opereren op lagere niveaus van DC-spanning, is het niet nodig een externe DC AFCI (vlamboog circuitonderbreker) te integreren in de installatie van een Enphase-micro-omvormerssysteem. De inherente kenmerken van de micro-omvormers maken dit een veel veiligere omvormerstechnologie.

### **AC-vlamboog**

DC is direct, wat betekent dat de geleider altijd levend is en nooit naar nul gaat. AC is wisselend en kruist het nulpunt een keer in elke halve cyclus, dus het risico op het behouden van vlambogen is veel lager dan bij DC. Het is daarom niet nodig een AC AFCI (vlamboog circuitonderbreker) te integreren in de installatie van een Enphase-micro-omvormerssysteem. Het converteren van het PV-vermogen naar AC op paneelniveau vermindert eveneens de lengte van DC-bekabeling en dus het risico op in serie geschakelde vlambogen.

### **Elektrische schok**

De directe aard van DC betekent dat een feitelijke elektrische schok de neiging heeft u vast te houden en "binnen te trekken", terwijl AC de neiging heeft u weg te duwen vanwege de afwisselende aard van de stroom. Er zijn een groot aantal redenen waarom huizen met AC zijn bekabeld en niet met DC, en een van de belangrijkste redenen is de veiligheid.

### **Snelle Uitschakeling**

De bedoeling van de vereiste Snelle Uitschakeling is de veiligheid van brandweermannen te verbeteren wanneer zij reageren op een brand in gebouwen met zonne-energiesystemen. Het verzoek is een eenvoudige methode te bieden aan brandweermannen om DC-geleiders op zonne-energiesystemen uit te schakelen om te zorgen voor een veilige toestand op het dak van een gebouw tijdens een brand. Dit is omdat op een standaard zonne-energiesysteem met stringomvormer de DC-bekabeling van het zonne-energiesysteem ingeschakeld blijft zo lang de zon schijnt, ook als de omvormer is uitgeschakeld.

Zoals eerder beschreven, hebben de elektrische PV-zonne-energiesystemen met Enphase-micro-omvormers een omvormer voor het uitschakelen van de nutsvoorziening direct onder elk zonnepaneel waarmee lage DC-spanning wordt geconverteerd naar AC-stroom die compatibel is met het elektriciteitsnet. Wanneer het elektriciteitsnet beschikbaar is en de zon schijnt, controleert elke micro-omvormer of het elektriciteitsnet opereert binnen de vereisten van de aansluiting van het elektriciteitsnet (bv. IEEE 1547). Alleen dan wordt AC-vermogen geëxporteerd naar de elektriciteitsaansluiting voor gebruik van ladingen op locatie of het exporteren van vermogen naar het elektriciteitsnet om door anderen te worden gebruikt. Wanneer er een storing is in het elektriciteitsnet of de AC-circuits van het PV-systeem zijn losgekoppeld van de elektriciteitsaansluiting via een AC-onderbreker, betekent het ontkoppelen van AC dat micro-omvormers stoppen met het produceren van AC-vermogen in een aantal AC-cycli. Enphase-micro-omvormers (IQ7™-serie, IQ6™-serie, M-serie, S-serie en C-serie) kunnen niet functioneren als een AC-spanningsbron. Dit betekent dat de Enphase-micro-omvormers zonder een AC-energiebron geen spanning kunnen opwekken in aangesloten bekabeling en dat er geen AC-spanning of stroom wordt geïnjecteerd in de uitvoercircuits van de omvormer of het elektriciteitsnet.

Aan de andere kant vereisen stringomvormers aanvullende apparatuur om te voldoen aan de vereisten van Snelle Uitschakeling, zoals gespecialiseerde elektriciteitskasten voor Snelle Uitschakeling geïnstalleerd op het dak binnen 30 cm van de reeks. De schakelaar voor uitschakeling of aandrijving van Snelle Uitschakeling moet voor eerstehulpdiensten (de brandweer) toegankelijk zijn vanaf de grond. Er moet tevens een voorziening worden getroffen zodat de bekabeling van de apparaten voor Snelle Uitschakeling op het dak kan worden bestuurd. Al deze aanvullende hardware en bekabeling betekent extra installatietijd en hogere kosten. Het belangrijkste is echter dat alle benodigde onderdelen voor Snelle Uitschakeling storingspunten zijn en dus kunt u uiteindelijk meerdere enkelvoudige storingspunten hebben waarbij elk punt afhankelijk is van het andere om het systeem veilig te houden. Dus, zijn die geïnstalleerde mechanismen elke keer op de juiste wijze geïnstalleerd? En vallen die mechanismen weleens uit? Het hoeft maar één keer te gebeuren.

Sommige stringomvormers met optimizers noemen hun DC graag “Veilige DC”. Wanneer de Snelle Uitschakeling wordt geactiveerd (vanwege een storing in de bekabeling of uitschakelen van de omvormer of defect in de omvormer), zorgt elke optimizer voor het afsluiten van 1 volt DC. Wanneer een optimizer echter defect is, of erger nog, wanneer meerdere optimizers defect zijn, kan de DC-spanning van meerdere PV-panelen de spanning overschrijden en mogelijk een schok geven aan iemand die aan de serie werkt, de installateur of de huiseigenaar, met name op het moment dat die persoon denkt dat het systeem is uitgeschakeld.

In sommige regio's geven de voorschriften expliciet aan dat activeringsapparaten de PCU's of vermogen-activerende eenheden (micro-omvormers) moeten uitschakelen. In geval van micro-omvormers van Enphase fungeren de onderbrekers in het voornaamste laadcentrum (die de PCU's verbinden met de busbar) of combinatie-onderbrekers als activeringsapparaten.

Waar het uiteindelijk om gaat is dat in een Enphase-micro-omvormerssysteem, wanneer de AC-elektriciteitsbron op enige manier is verwijderd van de uitvoercircuits van de omvormer, zoals een AC-onderbreker, loskoppeling van de AC of verwijdering van het zonnepaneel, de micro-omvormer de Snelle Uitschakeling-functie in werking stelt. Met een Enphase-micro-omvormerssysteem vindt deze uitschakeling in een paar seconden plaats en, omdat alle omvormers zich binnen de reeks bevinden, zijn er in geen enkele richting enige andere geactiveerde geleiders die zich meer dan 30 cm van de reeks bevinden, ook niet binnenin het gebouw. Zodoende voldoen de Enphase-micro-omvormerssystemen aan de vereisten voor Snelle Uitschakeling zonder de noodzaak om aanvullende elektrische apparatuur te installeren.