

Valokaarisuojaus aurinkosähköjärjestelmissä

© Fronius International GmbH

Versio 1.0 05/2023

Liiketoimintayksikkö Aurinkoenergia

Fronius pidättää itsellään kaikki oikeudet, erityisesti kopiointi-, jakelu- ja käännösoikeudet. Mitään osaa tästä teoksesta ei saa jäljentää millään tavalla ilman Froniuksen kirjallista lupaa. Sitä ei saa tallentaa, muokata, jäljentää tai levittää millään sähköisellä tai elektronisella järjestelmällä. Teitä muistutetaan täten siitä, että tässä asiakirjassa julkaistut tiedot voivat muuttua, vaikka niiden laatimisessa on noudatettu suurinta mahdollista huolellisuutta, ja että sen laatija tai Fronius eivät voi ottaa mitään oikeudellista vastuuta.

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Valokaaret aurinkosähköjärjestelmissä	7
3	Tasavirtakaaren havaitseminen ja katkaisu aurinkosähköjärjestelmissä	9
4	PV-valokaarivikasvun vikasuojausta koskevat standardit	12
5	Fronius Arc Guard	13
6	Turvallisuuden parantaminen ilman kompromisseja Arc Guardin avulla	14
7	Viitteet.....	15

1 Johdanto

Nykyään aurinkosähköjärjestelmistä on tullut erittäin turvallisia. Sellaiset ominaisuudet kuin RCMU (vikavirtojen valvontayksikkö), tasavirran katkaisija ja erotusvalvonta ovat osaltaan vaikuttaneet erittäin korkean turvallisuustason saavuttamiseen. Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuus on kuitenkin edelleen paljon keskustelua herättävä aihe aurinkoenergiateollisuudessa.

Tätä aihetta käsiteltäessä on tehtävä perustavanlaatuinen ero seuraavien seikkojen välillä:

- **tulipaloriski** (todennäköisyys, että tulipalo syttyy), sekä
- **pelastushenkilöstön riski** (palomiehen loukkaantumisen todennäköisyys tulipalon aikana).

Toinen riski liittyy tiukasti **ensimmäiseen riskiin** ja on **seurausta siitä, eli** pelastushenkilöstöön kohdistuva riski on olemassa vasta sen jälkeen, kun tulipalo on jo syttynyt. Tämän vuoksi tulipalon riskiä vähentämällä pienennetään automaattisesti myös pelastushenkilöstön riskiä.

Saksassa, joka on yksi suurimmista aurinkosähkömarkkinoista ja jossa on asennettu yli 2 miljoonaa aurinkosähköjärjestelmää, on viimeisten 20 vuoden aikana tapahtunut tulipaloja 0,006 prosentissa kaikista asennuksista. [1]. Tämä tarkoittaa, että tilastollisesti **99,994 prosenttia** aurinkosähköasennuksista **ei aiheuta tulipaloja**. Samanlaisia lukuja raportoitiin Yhdistyneen kuningaskunnan markkinoilta [2].

Aina kun puhumme aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuudesta, meidän on siis pidettävä mielessä, että puhumme 0,006 prosentista aurinkosähköjärjestelmistä, jotka ovat tilastollisesti "vaarassa". Toisin sanoen: 1 joka 17 000 asennuksesta.

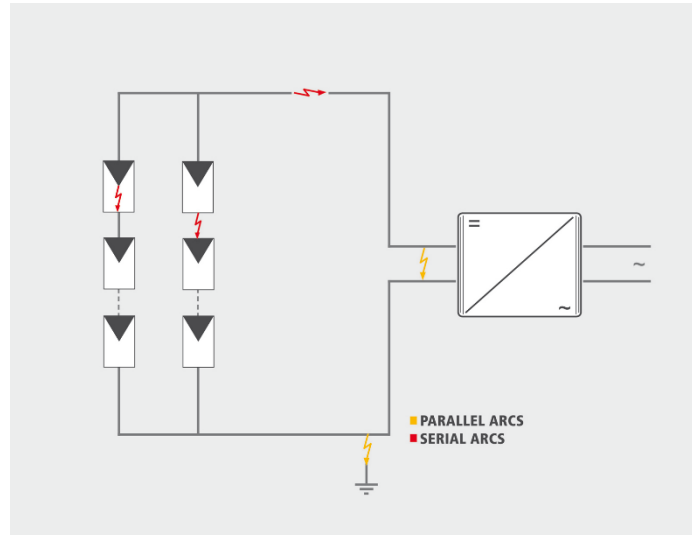
Tulipaloriskin vähentämiseksi entisestään ja tulipalon kohteeksi joutuvien järjestelmien lukumäärän vähentämiseksi voidaan harkita **lisäturvallisuustoimenpiteitä**, kuten:

- asennustoimenpiteet (esim. riittävän ilmanvaihdon varmistaminen, syttyvien materiaalien kertymisen välttäminen sekä johtimien ja liittimien asianmukainen asentaminen). [3]), tai
- teknisiin laitteisiin, kuten maasulku- ja valokaarisuojalaitteisiin, perustuvat toimenpiteet.

Koska tilastollisesti turvallisten järjestelmien prosenttiosuus on kuitenkin jo nyt hyvin korkea, lisätoimenpiteitä valittaessa on oltava erityisen huolellinen sen varmistamiseksi, että niillä ei ole kielteisiä vaikutuksia muihin turvallisuusnäkökohtiin. **Valokaarisuojaus** on hyvä esimerkki turvallisuustoimenpiteestä, joka **vähentää** tehokkaasti **tulipalon** riskiä **vaarantamatta muita turvallisuusnäkökohtia**.

2 Valokaaret aurinkosähköjärjestelmissä

0,006 prosentissa järjestelmistä, joissa on tulipalon vaara, syynä ovat sähkökaaret aurinkosähköjärjestelmän tasavirtapuolella.

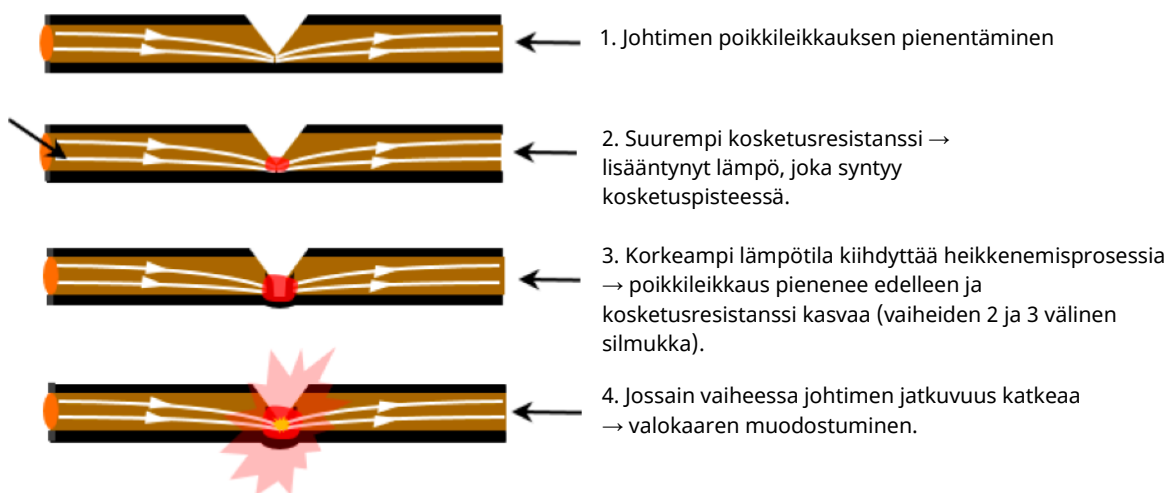


Kuva 1: Sarja- ja rinnakkaiskaaret aurinkosähköjärjestelmissä

On olemassa 2 erilaista tasavirtakaarta (Kuva 1):

1. **Rinnakkaisvalokaaret:** näitä voi syntyä kaapelin vaurioituneen eristyksen seurauksena, mikä voi johtaa oikosulkuun DC+:n ja DC-:n välillä tai DC+/DC-:stä maahan. Rinnakkaisvalokaaret ovat kuitenkin hyvin epätodennäköisiä, erityisesti Euroopassa käytetyissä maadoittamattomissa aurinkosähköjärjestelmissä: jotta kahden tasavirtakaapelin välille syntyisi rinnakkaisvalokaari, eristyksen olisi vaurioituttava samassa kohdassa ja samaan aikaan, kun taas kaksinkertaisen maadoittavan oikosulun tapauksessa taajuusmuuttajan integroitu eristysvalvonta havaitsisi ensin 1st maadoittavan oikosulun.
2. **Sarjakaaret:** Nämä liittyvät **liitänköhtiin** (esim. moduulien liitänköasioissa, tasavirtaliittimissä, yhdistelmärasioissa, tasavirtakytkimien ja -taajuusmuuttajien liittimissä jne.), ja ne voivat muodostua, kun liitänkö on huono tai heikentynyt ja katkeaa lopulta. Tämä voi johtua monista eri tekijöistä, kuten koskettimien ja liitänköjen ikääntymisestä tai pitkäaikaisesta sään vaikutuksesta, liittimien mekaanisista vaurioista, huonosta kunnossapidosta, ruuviliittimien riittämättömästä kiristämisestä ja tasasähköliittimien huonosta asennuksesta (esim. väärästä asettamisesta, huonosta puristamisesta tai vääränlaisesta sovittamisesta). Tällaisissa tilanteissa liitänkön kosketuspinta-ala pienenee ja kosketusvastus kasvaa. Tämä

johtaa lisääntyneeseen lämpöhäviöön ja korkeampaan lämpötilaan liitoksessa, mikä puolestaan nopeuttaa heikkenemisprosessia entisestään (Kuva 2). Lopulta johtimen jatkuvuus katkeaa ja muodostuu hyvin pieni ilmarako. Jos sähkökenttä on riittävän voimakas ($> 3 \text{ kV/mm}$ [4]), ilma ionisoituu ja tuottaa johtavan plasman (jonka määrittelemme valokaareksi), jolloin virta pääsee virtaamaan ilmaraon läpi.



Kuva 2: Valokaaren muodostumisprosessi johtimen sisällä [12]

Palava valokaari voi saavuttaa yli $10\,000 \text{ K:n}$ lämpötilan. [5] (mikä voi sytyttää lähellä olevan palavan materiaalin ja sytyttää tulipalon), ja se säteilee sekä näkyvää että UV-valoa.

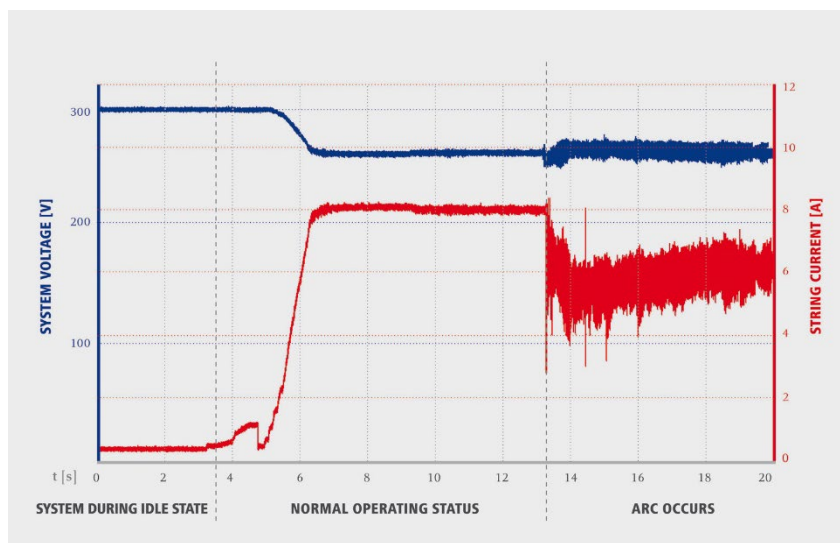
Ensimmäinen suojaustaso tasavirtakaaria vastaan, jota olisi aina noudatettava, on **minimoida liitäntäpisteiden määrä**, jotta valokaarien riski olisi mahdollisimman pieni. Tätä voidaan pitää "passiivisena" suojaustoimenpiteenä, koska se on järjestelmän suunnittelu- ja asennustapaan liittyvä toimenpide. [6]. Vasta kun tätä riskinminimointitoimenpidettä on noudatettu, on järkevää toteuttaa muita ja "aktiivisia" riskinhallintatoimenpiteitä.

3 Tasavirtakaaren havaitseminen ja keskeyttäminen aurinkosähköjärjestelmissä

Tulipalojen perimmäisen syyn osalta voidaan todeta, että aurinkosähköjärjestelmien tulipalojen (suhteellisen vähäisestä) määrästä sarjakaarien osuus on paljon suurempi kuin rinnakkaiskaarien, mikä johtuu aurinkosähköjärjestelmien tasavirtapuolen kosketuspisteiden suuresta määrästä. Tämän vuoksi valokaarivikojen havaitsemiseen liittyvä teknologia ja standardit ovat keskittyneet sarjakaariin. Vaihtovirtavalokaarien ilmaisimia ei myöskään voida käyttää tasavirtavalokaarien havaitsemiseen niiden erilaisten ominaisuuksien vuoksi (tasavirroissa ei ole nollakohdan läpimenoa), joten tasavirtavalokaarien havaitsemiseen tarvitaan erityistä teknologiaa.

Viime vuosikymmenen aikana on kehitetty erilaisia tekniikoita valokaarien havaitsemiseksi ja katkaisemiseksi aurinkosähköjärjestelmissä. [7, 8, 9] mutta spektrinen valokaaren havaitseminen on alan kehittynein ja laajimmin käytetty tekniikka. Se perustuu valokaaren aiheuttamien jännite- ja virtasignaalien analysointiin taajuusalueella.

Kun sarjakaari syntyy, aurinkosähköjärjestelmän jännite- ja virtasignaalit muuttuvat merkittävästi (Kuva 3). Normaalikäytössä signaalien vaihtovirtakomponentti on aika-alueella hyvin pieni. Valokaaren sattua signaalit ovat hyvin epävakaita, ja niissä on huippuja ja suuria muutosnopeuksia. Signaali voidaan muuntaa ja analysoida taajuusalueella FFT:n (Fast Fourier Transform) avulla. Tällöin valokaaren aiheuttama kohina näkyy taajuuskomponenttien suuremmasta amplitudista, joka nostaa järjestelmän yleistä "kohinatasoa" verrattuna normaaliolosuhteisiin ilman valokaarta (Kuva 4). erusilmäintekniikoissa verrataan virta- ja jännitesignaalin mitattuja arvoja määritettyihin raja-arvoihin sen määrittämiseksi, onko järjestelmä valokaari- vai valokaarettomassa tilassa.



Kuva 3: Jännite- ja virtasignaali aurinkosähköjärjestelmässä aika-alueella ennen valokaarta ja valokaaren aikana.

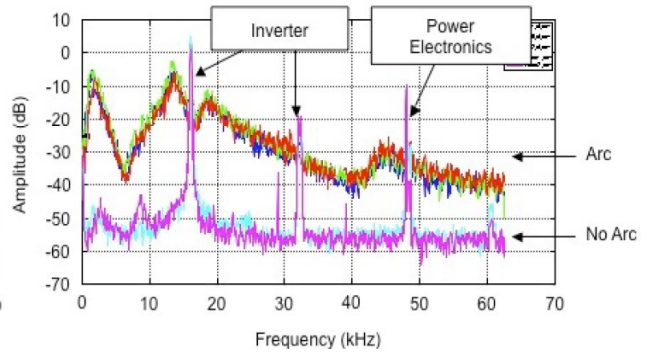
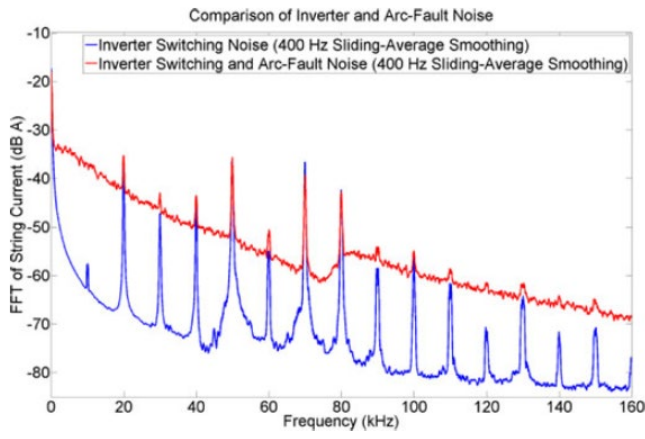
Sen määrittäminen, milloin järjestelmässä on valokaari, ei kuitenkaan ole suoraviivaista, ja siihen liittyy useita haasteita. [7, 9] Esimerkiksi:

- itse taajuusmuuttaja aiheuttaa tietyillä taajuuksilla (taajuusmuuttajasta riippuen) kohinapiikkejä, jotka voivat olla päällekkäisiä valokaaren allekirjoituksen kanssa, kuten voidaan havaita seuraavassa kuvassa Kuva 4.
- muiden sähköllä toimivien elektronisten laitteiden, kuten lataussäätimien ja DC/DC-muuntimien, kytkentätaajuus sekä muiden elektronisten laitteiden läsnäolo (aurinkosähkömagneettisessa kentässä tai sen läheisyydessä) voivat aiheuttaa lisäkohinaa.
- pitkät aurinkosähkökaapelit voivat toimia antennina lisäämällä kohinaa 100 kHz:n ja 500 MHz:n välisellä taajuusalueella. PV-kaapelit voivat induktiivisen komponenttinsa vuoksi toimia myös alipäästösuodattimena, mikä vaimentaa valokaaren kohinaa korkeilla taajuuksilla ja vaikeuttaa valokaaren havaitsemista.
- alle 1 kHz:n taajuuksilla virran vaiheet ja vaihtelut, jotka johtuvat esimerkiksi taajuusmuuttajan kytkeytymisestä pois päältä, tehonsäädöistä tai ympäristöolosuhteista, kuten nopeasti liikkuvista pilvistä tai tuulen aiheuttamasta tärinästä, voivat aiheuttaa sen, että virtasignaali näyttää kaarelta.

Kaikki nämä häiriölähteet voivat aiheuttaa **kahdenlaisia ongelmia** valokaari-ilmaisimelle:

- ylimääräinen kohina voi mennä päällekkäin valokaarisignaalin kanssa ("**peittäminen**"), jolloin valokaari voi säilyä havaitsematta, tai
- ylimääräinen kohina voidaan tulkita todelliseksi valokaareksi ("**kohina tai väärä laukaisu**"), ja taajuusmuuttaja voi laukaista, vaikka todellista valokaarta ei olisikaan, jolloin sähköntuotanto keskeytyy.

Peittäminen on turvallisuuteen liittyvä kysymys, kun taas väärä laukaisu liittyy enemmän suorituskykyyn ja kustannuksiin järjestelmän ei-toivotun seisokin vuoksi. Asianmukaisen ja vankan valokaarianturin pitäisi pystyä hallitsemaan nämä haasteet ja havaitsemaan valokaaret erittäin luotettavasti ja tarkasti ja samalla minimoimaan väriin laukaisujen riski. [10].

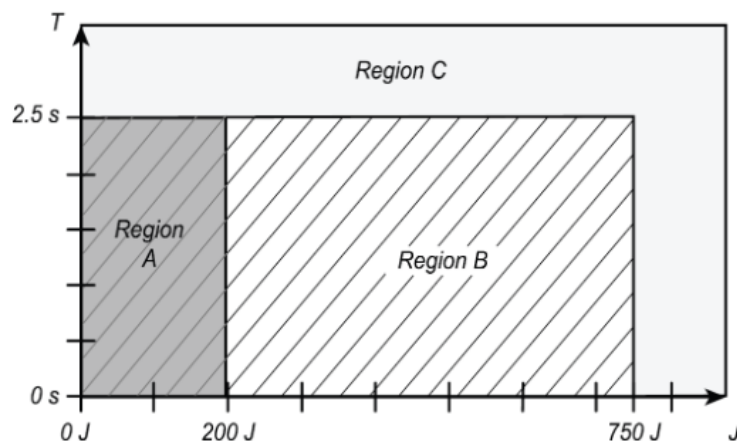


Kuva 4: Esimerkkejä taajuusspektristä kaaren kanssa (punaiset käyrät) ja ilman kaaria (siniset/violetit käyrät). [8, 10]

4 PV-valokaarivikasvun vikasuojaukseen koskevat standardit

Ensimmäinen standardointi tapahtui vuonna 2011 Yhdysvalloissa **UL1699B-standardilla**, jossa otettiin käyttöön nimi "AFCI" (Arc-Fault Circuit Interrupter), jolla tekniikka yleisesti tunnetaan. Kansainvälisellä tasolla on myös IEC-standardi (**IEC 63027**), jossa käytetään hieman erilaista terminologiaa: "AFD" (Arc-Fault Detector) on laite, joka valvoo vaihtovirtasignaaleja tasavirtajohdoissa ja havaitsee valokaaret, kun taas "AFI" (Arc-Fault Interrupter) on laite, joka katkaisee virtapiirin saatuaan käskyn valokaaren havaitsemisen jälkeen AFD:ltä. AFD:n ja AFI:n yhdistelmä muodostaa niin sanotun **AFPE:n (Arc-Fault Protection Equipment)**. Tämä voi olla joko erillinen laite tai se voidaan integroida taajuusmuuttajaan.

Standardissa IEC 63027 edellytetään AFPE:n testaamista erilaisissa valokaariolosuhteissa, mukaan lukien erilaiset valokaarivirrat, avoimen piirin jännite ja mpp-jännite, erilaiset valokaariväleissä ja valokaarigeneraattorin elektrodien erotusnopeudet. Valokaari on havaittava 2,5 sekunnin kuluessa tai ennen kuin valokaaren energia ylittää 750 J, sen mukaan kumpi tapahtuu ensin (Kuva 5).



Kuva 5: UL1699B:n kuva valokaarivikojen havaitsemiseen tarvittavista aika- ja energiavaatimuksista, jotka on asetettu myös IEC 63027:ssä, [11]

5 Fronius Arc Guard

Froniuksen turvallisuuskonseptissa keskitytään kahteen tasoon:

- Ensimmäinen ja perustavanlaatuinen taso on riskien minimointi (passiivinen):
tasasähkökaarien riskiä olisi vähennettävä mahdollisimman paljon järjestelmän asianmukaisella suunnittelulla, asennuksella ja kunnossapidolla. Parhaaseen käytäntöön kuuluu **liitäntäkohtien määrän minimointi**, sen varmistaminen, että kaikki liitännät on toteutettu asianmukaisesti, sekä laadunvarmistus asentajakoulutuksen, säännöllisen huollon ja tarkastusten avulla. Näillä toimenpiteillä vähennetään mahdollisten valokaarivikojen syntymistä ja niiden vaatimien toimenpiteiden määrää.
- Toinen taso on valokaarien varsinainen sammuttaminen (aktiivinen): kun mahdollisten valokaarivikojen määrä on vähennetty minimiin, aurinkosähköjärjestelmän turvallisuutta voidaan edelleen parantaa AFPE:n avulla.

Tätä toista suojaustasoa varten Fronius on kehittänyt huippuluokan valokaaren havaitsemis- ja katkaisutekniikan, Fronius Arc Guardin.

Tätä teknologiaa kehittäessään Fronius pystyi hyödyntämään Perfect Welding -yksikön laajaa tietotaitoa ja vuosien kokemusta kaarihitsauksesta. Tuloksena oli vankka tekniikka, joka perustuu klassiseen FFT-pohjaiseen spektrikaaridetektoriin ja jota on kehitetty edelleen kehittyneillä hahmontunnistustekniikoilla. Arc Guard käyttää myös koulutettua valokaaren tunnistusalgoritmia, jota Froniuksen tutkimus- ja kehitystoiminta parantaa säännöllisesti, jotta tunnistustarkkuus kasvaa jatkuvasti ajan myötä.

6 Turvallisuuden parantaminen ilman kompromisseja Arc Guardin avulla

Aurinkosähköjärjestelmät ovat jo nyt hyvin turvallisia. Tilastollisesti yli 99,994 prosenttia asennetuista järjestelmistä ei kärsi tulipalosta, joten "turvallisten asennusten" määrä on jo nyt erittäin suuri. Tämä tarkoittaa sitä, että jos tätä prosenttiosuutta yritetään nostaa vielä korkeammaksi, lisäys on suhteellisen pieni (esimerkiksi 0,001 prosenttia). Tämän vuoksi **kaikki lisäturvallisuustoimenpiteet olisi arvioitava huolellisesti ja** varmistettava, että (pienestä) hyödystä ei aiheudu sivuvaikutuksia, jotka tekisivät tällaisen toimenpiteen käytön kyseenalaiseksi.

Yksi esimerkki on moduulitason tehoelektroniikan käyttö. Niiden sammutustoiminnon on tarkoitus lisätä palomiesten turvallisuutta, mutta tällaisten elektroniikkalaatikoiden käyttöönotto kunkin aurinkosähkömoduulin alla lisää aurinkosähkömagneettiseen ryhmään suuren määrän tasavirtaliittimiä (vaikka ne olisi ensisijaisesti minimoitava, koska se on perustavanlaatuinen ensimmäisen tason suojaus). Valokaaririski itse asiassa lisääntyy, samoin kuin tulipaloriski, kuten todetaan IEC TR 63226:ssa, IEC:n teknisessä raportissa, jossa annetaan ohjeita rakennusten aurinkosähköjärjestelmien tulipaloriskien vähentämiseksi. [3].

Toisaalta Arc Guardin tarjoama **lisäturvallisuus** saavutetaan käyttämällä taajuusmuuttajaan **integroituja** ohjelmistoja ja laitteistoja, joten ulkoisia lisälaitteita tai -laatikoita ei tarvita **eikä** järjestelmään **lisätä uusia liitäntäpisteitä**. Tämä tarkoittaa myös sitä, että asennuksen aikana ei ole ylimääräistä vaivaa.

AFPE-järjestelmänä Arc Guard perustuu lisäksi ennaltaehkäisevään periaatteeseen, eli se havaitsee ja **sammuttaa valokaaret ennen kuin ne voivat johtaa tulipaloon**. Kun Arc Guard tunnistaa valokaaritilan, vaihtosuuntaajan tehovaiheet keskeyttävät virransiirron ja lopettavat sähkönsyötön verkkoon. Näin virran kulku katkeaa ja valokaari sammuu.

Koska **Arc Guard vähentää tulipalon todennäköisyyttä entisestään**, se on myös paras suoja hätätilanteessa toimiville, sillä **ilman tulipaloa ei ole riskiä palomiehille**.

7 Viitteet

- [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, "Rakennusten aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien paloriskien hallinta", 2021.
- [4] Shibo Lu, et al., "Study on DC Series Arc Fault in Photovoltaic Systems for Condition Monitoring Purpose", *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 ja 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, s. 982-997, 2015.
- [9] G. Artale et al., "DC-sarjan kaariviat aurinkosähköjärjestelmissä. 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.