



Mikko Syrjö

# MLPE-teknologiaa käyttävien aurinkosähkövoimaloiden turvallisuuden vertailu string-invertteri-tekniikkaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri AMK

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

23.4.2024

## Tiivistelmä

Tekijä(t):	Mikko Syrjö
Otsikko:	MLPE-teknologiaa käyttävien aurinkovoimaloiden turvallisuuden vertaaminen string-invertteri-tekniikkaan
Sivumäärä:	42 sivua + 2 liitettä
Aika:	23.4.2024
Tutkinto:	Insinööri AMK
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja(t):	Lehtori Kari Salmi Myyntipäällikkö Antti Lehmuskoski

---

Insinööri työ tehtiin Solnet Groupille tutkivana työnä, jonka tarkoituksena oli selvittää aurinkosähkövoimaloiden vikaantumisia Suomessa sekä maailmalla ja vertailla saadun tiedon perusteella MLPE-tekniikkaa käyttävien aurinkovoimaloiden turvallisuutta yleisiin string-invertterijärjestelmiin. Aineistona oli tilastot aurinkosähkövoimaloiden vikaantumisista ja sitä hankittiin eri lähteistä, joista tärkeimmiksi osoittautuivat Suomen Pelastusopiston hallinnoima tietojärjestelmä Pronto sekä saksalainen maailmanlaajuinen tutkimus aurinkosähkövoimaloiden tulipaloista.

Työssä käytiin aluksi läpi aurinkosähköjärjestelmän tyypilliset komponentit sekä niiden toimintaperiaatteet. Hypoteesina oli, että MLPE-tekniikka ei lisää riskiä paloturvallisuuteen. Insinööri työssä hyödynnetty tutkimusaineisto oli hyvin rajattua johtuen aiheen vähäisestä tutkinnasta. Tutkimusosuus nojasi pääosin verkosta saataviin aineistoihin, sillä kirjallisuutta aiheesta ei ole. Tilastoja aurinkosähkövoimaloiden vikaantumisista yritettiin saada myös yksityisiltä tahoilta, kuten vakuutusyhtiöiltä, asiantuntijoilta sekä toiminimiyrittäjiltä.

Insinööri työn tuloksena todettiin, että turvallisuus aurinkosähköjärjestelmässä on monen eri tekijän summa. Tutkimuksen aineiston perusteella turvallisuuden merkittävimmät heikkoudet aurinkosähköjärjestelmässä ovat tasasähköpiiri ja vaihtosuuntaaja, sillä suurin osa tulipaloista oli saanut alkunsa näistä. Aineistosta ei voida vetää suoraa johtopäätöksiä MLPE-laitteiden merkityksestä aurinkosähkövoimaloiden paloturvallisuudelle, koska laitteiden hajoamisista ei ole tarpeeksi tilastoja ja palon syttymissy on vaikeaa paikantaa riittäväällä tarkkuudella. MLPE-laitteiden voidaan kuitenkin todeta vaikuttavan positiivisesti paloturvallisuuteen niiden turvallisuustoimintojen vuoksi. Päätelmää tukevat tutkimusaineistot ja kirjoittajan omat kokemukset aurinkosähköjärjestelmien asentajana sekä suunnittelijana.

Avainsanat: MLPE, MPPT, invertteri, PV, turvallisuus, virran optimoija

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author(s): Mikko Syrjö  
Title: Safety Comparison Between MLPE Technology Solar Power Plants and String-Inverters  
Number of Pages: 42 pages + 2 appendices  
Date: 23 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Environmental and Energy Technology  
Specialization option: Energy Technology  
Instructor(s): Kari Salmi, Senior Lecturer  
Antti Lehmuskoski, Sales Team Leader

---

This thesis was made for Solnet Group as a research. The purpose was to find the common reasons for malfunctions in solar power plants in Finland and all over the world to compare the safety of MLPE technology systems to common string inverter systems. The material used for this thesis was statistics of malfunctions in solar power systems. The material was acquired from different sources of which the most relevant sources proved to be from database Pronto which is operated by the Emergency services academy in Finland, and German worldwide research on fires caused by solar power plants.

The thesis began by reviewing solar power systems' typical components and their working principles. The hypothesis was that MLPE technology does not increase the risk for fire safety in the system. The material used in the research was limited due to low research rate of the subject. There is little literature on the subject of the thesis, which is why most of the material was found online. Statistics of solar power plants' malfunctions were also requested from private entities such as firms, experts and sole proprietors.

The result of the thesis was that safety in solar power plants is the sum of many different factors. On the basis of the source material of the thesis, the most significant weaknesses in solar power systems are direct current circuits and inverters as most of the fires originate from them. It is not possible to make direct conclusions about the fire safety of MLPE devices on the basis of source material because there are currently not sufficient statistics. Furthermore, investigating the fires is difficult with adequate precision to identify the exact component that caused the fire. As a result, it was stated that MLPE devices have potentially positive effect on the safety of solar power plants due to their safety features. This result is also supported by research materials and the author's personal experiences as a solar power plant installer and engineer.

Keywords: MLPE, MPPT, inverter, PV, safety, power optimizer

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Aurinkovoimaloiden toiminta	2
2.1	Järjestelmän komponentit	2
2.1.1	Aurinkopaneelit	2
2.1.2	Vaihtosuuntaajat ja mikrovaihtosuuntaajat	5
2.1.3	Virranoptimoijat	7
2.1.4	Kytkimet ja mittarit	8
2.1.5	MPPT-säätimet	10
2.2	String-invertteri-järjestelmän toiminta	11
2.3	MLPE-järjestelmän toiminta	12
3	Aurinkosähkövoimaloiden turvallisuus	13
3.1	Säköturvallisuus	13
3.1.1	Ylivirtasuojaus	14
3.1.2	Maadoitus ja sääolosuhteilta suojaus	14
3.1.3	Komponenttien kestävyys	15
3.1.4	Turvallisuusmerkinnät	16
3.2	Paloturvallisuus	17
3.2.1	Materiaalien vaatimukset	18
3.2.2	Henkilökunnan turvallisuus palotilanteessa	18
3.2.3	Tulipalon sammuttaminen ja jälkitoimenpiteet	19
3.3	Asennusturvallisuus	20
3.4	Ylläpito	22
3.5	Globaali turvallisuus	23
4	Turvallisuuden vertailu ja statistiikka	24
4.1	Aineiston keräys	24
4.2	Aineiston käsittely	25
4.2.1	Aurinkosähkövoimaloiden vikaantuminen Suomessa	26
4.2.2	Aurinkosähkövoimaloiden vikaantuminen maailmalla	31
4.3	Johtopäätökset	33
5	Yhteenveto	36

Lähteet	38
Liitteet	43
Liite 1. Excel-taulukko Suomesta saadusta aineistosta	43
Liite 2. Excel-taulukko saksalaisesta tutkimuksesta saadusta aineistosta	44

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käsitellään aurinkovoimaloiden turvallisuutta ja vertaillaan erilaisten aurinkovoimaloiden turvallisuutta statistiikkaan nojaten. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat aurinkovoimalan turvallisuuteen, ja verrata MLPE-tekniikkaa käyttävien aurinkovoimaloiden turvallisuutta string-invertteri-tyyppisiin aurinkosähkövoimaloihin. Tutkimus keskittyy pääasiassa Suomeen, mutta tiedon hakemisen haasteellisuuden vuoksi turvaututaan myös muualla maailmassa kerättyyn aineistoon.

Työssä käsitellään myös aurinkovoimaloiden toimintaa ja turvallisuutta Suomessa sekä maailmalla. Lisäksi työssä käydään läpi vaihtosuuntaajien eli invertterien sekä muiden MLPE-laitteiden toimintaa ja turvallisuutta. MLPE-laitteet ovat aurinkosähköjärjestelmissä olevia lisäkomponentteja. Työssä kerrataan aurinkovoimaloiden ja komponenttien toimintaperiaatteita turvallisuuden ymmärtämiseksi. Aineistona toimii tilastot aurinkosähkövoimaloiden tulipaloista, ja aineiston käsittely on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Alkuperäisessä aineistossa esiintyvien arkaluontoisten tietojen vuoksi sitä ei säilytetä käsittelyn jälkeen, vaan poistetaan Pelastuslaitoksen ohjeiden mukaisesti.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Solnet Group, joka rakentaa ja myy MLPE-tekniologiaa hyödyntäviä aurinkovoimaloita ympäri Suomea ja Eurooppaa. Tutkimuksen on tarkoitus hankkia tietoa laitteiden turvallisuudesta sekä tilastoista ja tarjota ajantasaista tietoa aurinkovoimaloiden turvallisuudesta. Tutkimus toteutettiin kirjallisena työnä verkkoaineistoa hyödyntäen, koska aiheesta ei ole tarpeeksi ajantasaista kirjallisuutta saatavilla.

## 2 Aurinkovoimaloiden toiminta

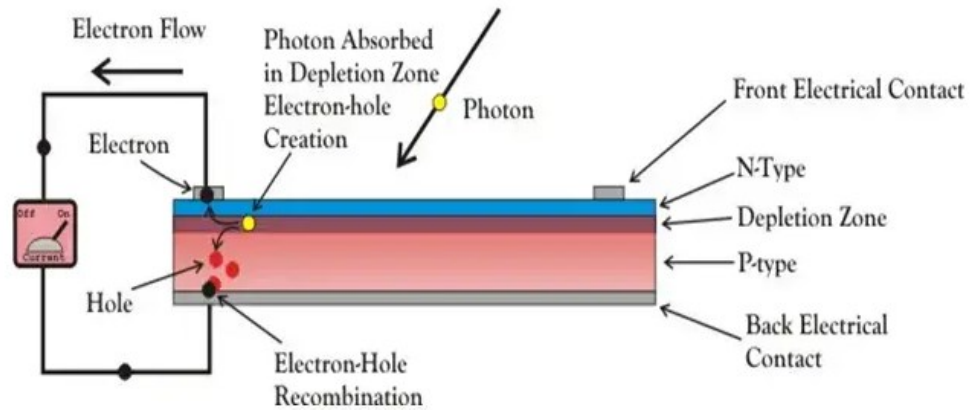
### 2.1 Järjestelmän komponentit

Alla olevissa luvuissa tarkastellaan aurinkosähkövoimaloiden komponentteja ja niiden toimintaa. Keskeisiin sähkökomponentteihin kuuluu aurinkopaneelit, kytkimet, mittarit, vaihtosuuntaaja ja virranoptimoijat.

#### 2.1.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelien toiminta perustuu fotonien absorbointiin. Aurinkokennojen peruseräite on muuntaa auringonvalosta piikiteisiin osuvia fotoneja elektronien liikkeeksi. Fotonilla on tietty todennäköisyys aiheuttaa elektronin liikkumista kennossa, ja tämä havaitaan esimerkiksi aurinkopaneelin hyötysuhteessa. Kun fotonin absorptio seurauksena elektroni alkaa liikkua, syntyy samalla sekä liikkuva aukko että liikkuva elektroni. Nämä elektronit tuottavat tasavirtaa. Tätä reaktiota kutsutaan valosähköreaktioksi. Aurinkokennot koostuvat N- ja P-tyyppisistä kerroksista sekä niiden välisestä PN-kerroksesta. PN-kerrosta kutsutaan PN-rajapinnaksi, johon liikkuvat aukot muodostuvat. Pii on yleisin puolijohde aurinkopaneeleissa, koska sitä esiintyy luonnossa runsaasti. Noin 95 % kaikista aurinkopaneelista käyttää puolijohdeenaan piitä. Runsaan esiintyvyytensä lisäksi se on myös edullinen ja pitkäkestoinen materiaali. Lisäksi tekniikkaa helpottaa se, että piin valmistustekniikoita oli hyödynnetty mikropiireissä ennen aurinkopaneeleita, mikä helpotti piin soveltamista aurinkovoimatekniikassa.

Toinen vaihtoehto piille on esimerkiksi perovskiitti, joka on myös halpa ja yksinkertainen valmistaa. Sen suurin ongelma on herkkyys kosteudelle, mikä tekee paneeleista kalliimpia, sillä niistä pitää tehdä täysin vesitiiviitä. Tämän lisäksi perovskiitti myös hajoaa nopeammin, mikä alentaa aurinkokennojen käyttöikä. Perovskiitti on kuitenkin jatkuvan kehitystyön alla ja mahdollinen korvaava vaihtoehto silikonille tulevaisuudessa. Kuva 1 havainnollistaa kennojen rakennetta ja kertoo yleisesti aurinkopaneelin valoreaktion toiminnasta. [1; 2; 3.]



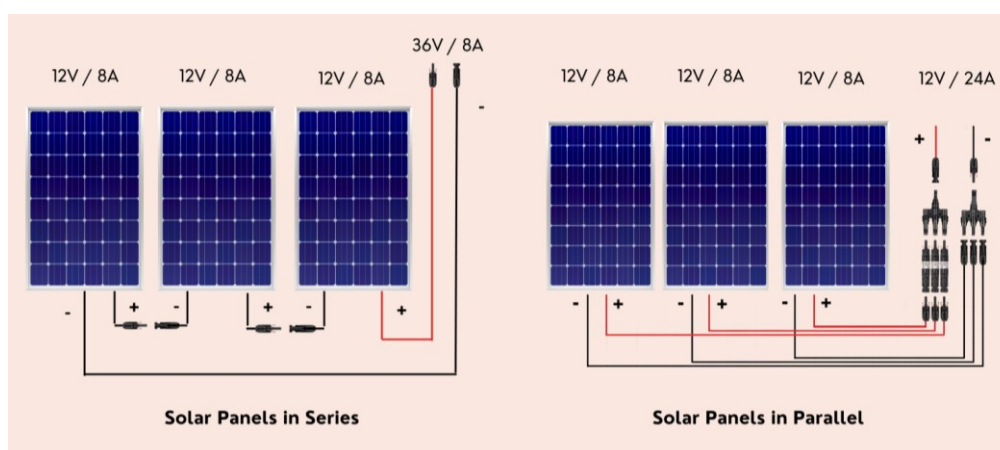
Kuva 1. PN-liitoksen yksinkertaistettu kaavio [4].

Tätä liitosta kutsutaan nimellä PN-liitos. PN-liitos on yleinen puolijohdeliitos, jota käytetään esimerkiksi LED-tekniikassa. Aurinkosähkötekniikassa PN-liitoksen tehtävä on luoda elektronien diffuusio, jonka avulla keskelle liitosten väliin syntyy vaadittu olosuhde elektronien siirtymiseen N-typin kerroksesta P-typin kerrokseen. Auringon säteily aiheuttaa PN-rajapintaan elektroniaukkopareja. Kun aukkopari syntyy tyhjennysalueeseen, PN-rajapinnassa vaikuttava sähkökenttä siirtää elektroneja N-puolelle ja aukkoja P-puolelle. Elektroni-aukopari ei aina synny PN-rajapinnalle, jolloin sen on siirryttävä diffuusion avulla tyhjennysalueelle. Kerrosten väliin muodostuva elektronien diffuusio mahdollistaa valosähköisen ilmiön. Kun PN-liitokseen lisätään sähköjohtimet kerrosten välille kuvan 1 mukaisesti, saadaan jatkuva tasasähkövirta valosähköreaktiosta. [5; 6.]

Aurinkopaneelit voidaan kytkeä sähkötekniikan mukaan sarjaan tai rinnan. Tyyppillisesti aurinkopaneelit kytketään isoissa aurinkosähköjärjestelmissä sarjaan, koska tällöin ainoastaan jännite kasvaa ja virta pysyy samana. Tämä on parempi vaihtoehto vaihtosuuntaajien kannalta, jotka muuntavat paneelien tuottaman tasavirran vaihtovirraksi. Jos suurissa järjestelmissä käytettäisiin rinnankytkentää, tarvittaisiin tarpeettoman paljon johtoja, koska paneelit kytketään suoraan yksittäisinä vaihtosuuntaajaan. Tästä koituu lisäkustannuksia ja energiahäviöitä. Pitkät tasavirtakaapelien asennukset tekevät aurinkovoimalasta vaikeammin asennettavan ja kalliimman rakentaa. Sarjaan kytkettynä ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmissä heikkoutena on paneelien rikkoutuminen. Koska paneelit

ovat sarjassa, jännitteen laskeminen rikkoutuneen paneelin takia laskee koko sarjan jännitteet. Tällöin siis yhden paneelin vikaantuminen poistaa koko kentän paneelit toiminasta. [7.]

Pienissä järjestelmissä voi olla järkevämpää kytkeä paneelit rinnan, kuten esimerkiksi yksityisten omakotitalojen katolle. Rinnan kytkettäessä virta pysyy samana, mutta jännite kasvaa. Rinnan kytkettäessä paneelit eivät ole toisiinsa kytkettyinä, vaan jokainen kytketään vaihtosuuntaajaan. Ongelmana on usein se, että vaihtosuuntaajissa ei ole tarpeeksi pistotulppia suuren paneelimäärän kytkemiseksi. Siksi rinnan kytkettäessä paneelit pitää yhdistää virranjakajaan ennen vaihtosuuntaajaa. Kuva 2 havainnollistaa erinomaisesti sarjaan- ja rinnankytkennän eroja. Vasemmalla kuvassa on sarjaan kytkettyjä paneeleja ja oikealla rinnan. Kytkentöjen välillä ei ole paneelin tehon kannalta eroja, sillä teho on jännitteen ja virran yhteenlaskettu tulo. [7.]



Kuva 2. Aurinkopaneeleiden kytkennän erot sarjaan ja rinnan [8].

Rinnankytkennässä on myös huomioitava virran suuruus. Vaihtosuuntaajilla on maksimikapasiteetit sekä virralle että jännitteelle. Suurinta sallittua jännitettä on helpompi hallita esimerkiksi virranoptimoijien avulla, mikä tekee vaihtosuuntaajan valinnasta helpompaa, koska ainoastaan sähkövirran suurin sallittu syöttö on otettava huomioon.

Viimeisenä aurinkopaneelien keskeisinä eroina on piikiteiden rakenne. Valmistajat rakentavat ja myyvät yksi- ja monikiteisiä aurinkopaneeleita. Kiteiden tekninen ero on kiteiden määrä aurinkokennossa ja se määrittää, miten paljon elektroneja voi liikkua kiteessä. Keskeisin ero kuluttajan näkökulmasta näiden välillä on tehokkuus. Yksikiteiset paneelit ovat uudempaa teknologiaa ja hieman tehokkaampia. Niitä myydään pienempinä ja ne ovat kalliimpia, kuin monikiteiset paneelit. Monikiteisten paneelien etu taas on hinta. Aurinkopaneelien valmistajat usein käyttävät tuotteidensa mainostamisessa hintayksikkönä valuutta per watti, eli paljonko paneelilla tuottama watti ostajalle maksaa. Tätä käyttäen monikiteiset tulevat halvemmaksi ostajalle. Jos tilaa ei kuitenkaan ole paljoa käytössä, yksikiteinen on optimaalisempi valinta. Lopuksi paneelin valintaan voi vaikuttaa kiteistä muodostuva väri. Yksikiteinen rakenne antaa paneelille selkeästi tummemman värin, kun taas monikiteinen rakenne antaa perinteisen kirkkaamman sinisen sävyn. [9.]

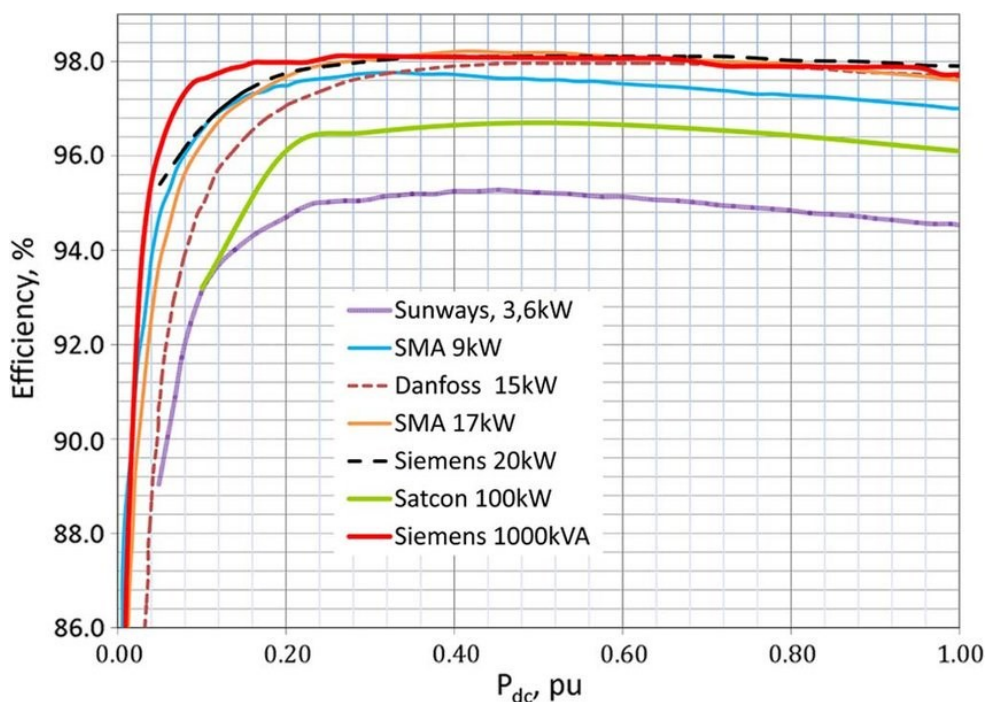
### 2.1.2 Vaihtosuuntaajat ja mikrovaihtosuuntaajat

Vaihtosuuntaaja eli invertteri on sähköinen komponentti, joka muuntaa sisään syötettävän tasavirran vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaaja on aurinkosähköjärjestelmissä kriittinen komponentti, koska aurinkopaneelit tuottavat sähköä tasavirtana. Suurin osa kiinteistöistä ja sähkölaitteista Suomessa hyödyntävät 50 Hz:n vaihtovirtaa, johon sähköä taajuus on muunnettava. Vaihtosuuntaaja kytketään aurinkosähköjärjestelmissä kiinteistön sähköpääkeskukseen. [10.]

Vaihtosuuntaajien avainominaisuuksia ovat

- tasavirran muuntaminen vaihtovirraksi
- oikean paneelimäärän tukeminen aurinkosähköjärjestelmässä
- kestää pitkään sähköistä kuormitusta
- palo- ja sähköturvallisuus. [11.]

Vaihtosuuntaajien hyötysuhteet vaihtelevat usein noin 94–98 %:iin. Suurissa aurinkosähköjärjestelmissä vaihtosuuntaajien hyötysuhteiden merkitys korostuu, sillä häviöt kasvavat jännitteiden kasvaessa. [11.] Kuvasta 3 nähdään vertailuna useiden eri valmistajien vaihtosuuntaajien hyötysuhteiden vaihtelun.

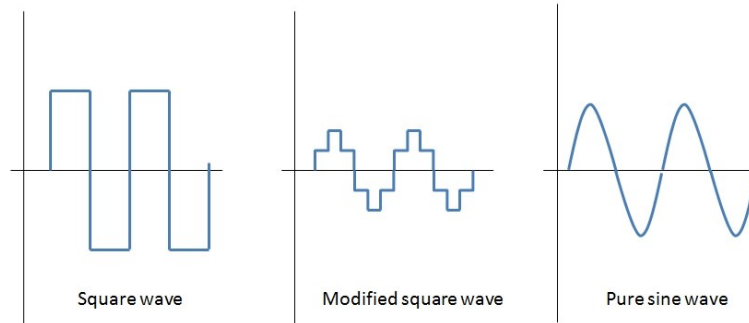


Kuva 3. Eri valmistajien vaihtosuuntaajien hyötysuhteiden vertailu koordinaatistossa [12].

Vaihtosuuntaajien merkitys aurinkosähköjärjestelmän turvallisuudelle on suuri, koska korkeat jännitteet ja virrat menevät sen kautta sähköverkkoon ja kiinteistöihin. Tyypillisesti korkeat jännitteet ja virrat ovat sähköjärjestelmissä vaarallisia ja tulipaloriskiä aiheuttavia kuin matalajännitteiset järjestelmät. [13.]

Vaihtosuuntaajia voidaan luokitella tuotettavan vaihtovirran aaltofunktion mukaan kolmeen eri luokkaan: siniaalto, modifioitua siniaalto ja kanttiaalto tuotaviin vaihtosuuntaajiin [14]. Useimmiten aurinkosähköjärjestelmissä käytetään kuitenkin siniaaltoista tai modifioitua siniaaltoista vaihtosuuntaajaa, sillä se sopii parhaiten sähkön käyttötarpeisiin. Kanttiaaltoa käyttävät vaihtosuuntaajat puo-

lestaan ovat parempia kapasitiivisiin, induktiivisiin kuormituksiin [15]. Alla olevassa kuvassa 4 eri vaihtosuuntaajien aaltotyypit vasemmalta oikealle: kanttiaalto, modifioitu siniaalto ja siniaalto. [16; 17.]



Kuva 4. Vaihtosuuntaajien kolme erilaista aaltotyyppiä [15].

Mikroinvertterit, eli mikrovaihtosuuntaajat kuuluvat MLPE-tekniikkaan. Ne ovat pienen skaalan vaihtosuuntaajia, jotka ovat tarkoitettu yksittäisten aurinkopaneelien virran muuntajiksi. Mikrovaihtosuuntaajat ovat harvinaisempia Suomessa, koska ne ovat kalliimpia ja vaativat monimutkaisempaa asetelmaa aurinkovoimalalle. Mikrovaihtosuuntaajat ovat hieman samanlaisia virranoptimoiden kanssa, sillä molemmat näistä MLPE-tekniikan laitetyypeistä auttavat estämään sarjaan kytketyn kentän täyttä vikaantumista yhden moduulin hajotessa. Suurissa järjestelmissä monien mikrovaihtosuuntaajien lisääminen tulee keskimäärin 20–30 % kalliimmaksi, vaikka niiden lisääminen laskee järjestelmän jännitettä huomattavasti. [18; 19.]

### 2.1.3 Virranoptimoidit

Virranoptimoidit ovat MLPE-tekniikassa käytettäviä aurinkosähköjärjestelmän virran ja jännitteen suuruuden optimoijia. Niiden tehtävä on nostaa tai laskea järjestelmässä paneelien tuottamaa tasavirtaa ja valvoa toimintakuntoa, kuten lämpötilaa ja virtaa. Virranoptimoidia laitetaan yleensä jokaiselle paneeliparille tai yksittäiselle paneelille. Suurissa järjestelmissä suositetaan yhdelle parille kytkentää. Niiden hyötysuhde on noin 99,5 %, joten laitteiden lämpöhäviöt ovat käytännössä olemattomat [20].

Virran optimoinnista on useita hyötyjä järjestelmän toiminnalle. Virranoptimoijat tekevät järjestelmästä älykkään eli internetyhteydellä seurattavan. Jokaista yksittäistä aurinkopaneelia on mahdollista seurata internetin välityksellä. Paneelien virtaa voi optimoida esimerkiksi varjostuksen, likaisuuden tai liian tehokkaan tuotannon vuoksi. Liian tehokas tuotanto saattaa aiheuttaa vaihtosuuntaajan vaurioitumista. Nykyteknologian avulla järjestelmän voi yhdistää mobiiliväliin ja automatisoida systeemin ilmoittamaan voimalan omistajalle mahdollisista vioista tai vaurioista. Kuvassa 5 on SolarEdgen virranoptimoija. [21.]



Kuva 5. Virranoptimoija, SolarEdge [22].

Uutena turvallisuutta edistävänä ominaisuutena SolarEdge käyttää virranoptimoijissaan liitinten lämmön monitorointia. Sensorit mittaavat tasasähköliitinten lämpötilaa oikosulkujen ja valokaarien varalta. Tasasähköliitoksia pidetään erityisen herkkinä kohtina sähköturvallisuudessa. Tämän vuoksi on tärkeää panostaa liitosten laatuun ja valvontaan. Uusissa virranoptimoijissa on myös Yhdysvaltojen aurinkosähköturvallisuusstandardin NEC 2017 mukaisesti kosketusturvallisuuteen säädetty jännite sekä pikasulkuominaisuudet. Tätä standardia käsitellään tarkemmin luvussa 3.5. [23.]

#### 2.1.4 Kytkimet ja mittarit

Aurinkosähkölaitteissa on turvallisuutta ja valvontaa edistäviä mekanisme, kuten kytkimiä ja mittareita. Näihin kuuluu muun muassa seuraavat komponentit:

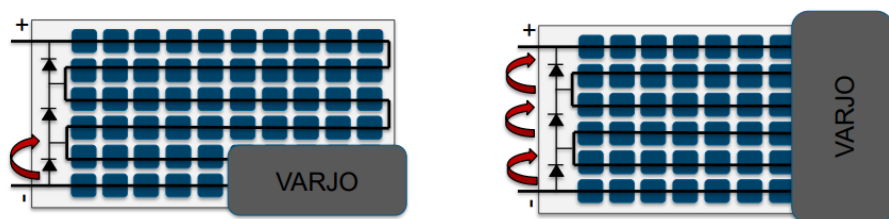
- turvakytkimet (häätä- ja erotuskytkimet)
- sähkömittarit (lämpö, virta ja jännite)
- esto- ja ohitusdiodit. [24 s. 6–7; 25; 26.]

Turvakytkin sijaitsee sähköpääkeskuksen ja vaihtosuuntaajan välissä erottaen aurinkosähköjärjestelmän verkosta. Turvakytkimet eivät katkaise järjestelmän ketjujen jännitettä, mutta estävät sen syöttämisen verkkoon. [24, s. 5.] Turvakytkimiä käytetään sekä tasavirta- että vaihtovirtaosissa. Turvakytkinten tehtävä on katkaista sähkön liikkuminen järjestelmästä kiinteistöön. [27, s. 4.]

Aurinkosähköjärjestelmissä mitataan aina virtaa ja jännitettä. Virranoptimoijat tekevät tätä jokaiselle paneelille. Muissa tapauksissa käytetään erillisiä mittareita vaihtosuuntaajan ja sähköpääkeskuksen välillä. Mikäli voimalassa mitataan tasavirtaa, on mittari asennettava ennen vaihtosuuntaajaa. Moderneissa MLPE-tekniikkaa käyttävissä voimaloissa voidaan myös käyttää useita erityyppisiä sensoreita, kuten esimerkiksi ympäristöä tutkailevia sensoreita. Ympäristöä mittaavia sensoreita on esimerkiksi paneelien lämpötilan, tuulen nopeuden ja säteilyvoimakkuuden mittarit. [26.]

Estodiodit tarkoittavat sellaista aurinkosähköjärjestelmän lisäkomponenttia, joka estää vastasuuntaisen virran pääsyn moduuliin, aurinkopaneeliin tai siihen liitettyyn paneeliketjuun. [25, s. 8.] Estodiodit toimivat paneelin tuotannon aikaan eli siis vain päivisin. Jos järjestelmässä on kiinni energiavarastoja, kuten akkuja, on syytä siirtyä yöhön soveltuvaan estodiodiin. [25, s. 46.]

Ohitusdiodeja voidaan hyödyntää aurinkokennoissa eli paneelien rakennustekniikassa. Ohitusdiodeilla on suurempi vaikutus järjestelmän tuottoon kuin turvallisuuteen. Ne estävät varjostuksesta tai kuumuudesta johtuvaa vastasuuntaista jännitettä muista kennoista. [25, s. 8.] Kuvasta 6 nähdään, kuinka ohitusdiodit toimivat paneelin rakenteessa.



Kuva 6. Ohitusdiodien toiminta aurinkopaneelissa [27, s. 7].

### 2.1.5 MPPT-säätimet

MPPT-säätimet (eng. Maximum Power Point Tracking) ovat MLPE-tekniikkaan luettuja laitteita, jotka seuraavat sähköntuotantoa. Vaihtosuuntaajiin integroituina ne voivat säätää vaihtosuuntaajan verkkoon syöttämää tehoa muuttuvan tasavirran mukaan, kun taas virranoptimoijiin integroituina ne optimoivat aurinkopaneeleita olosuhteiden mukaisesti, kuten lämmön ja säteilyn. Lisäksi MPPT-säätimet voivat säätää tasavirtaa vaihtosuuntaajille kokonaisissa ketjuissa. Näitä laitteita voi olla järjestelmässä yksi tai useampi, riippuen voimalan koosta. [24, s. 11; 28; 29.]

MPPT-säädintä voidaan rinnastaa virranoptimoijaksi kokonaisille ketjuille. Se yrittää säätää koko ketjun tuotantoa parhaaksi mahdolliseksi. Niiden heikkoutena on paneelisarjassa hajonneen paneelin säätäminen. Tällaisessa tilanteessa MPPT-säädin asettaa koko ketjun tuottamaan heikon paneelin mukaisesti. Se on halvempi ratkaisu virranoptimoijiin nähden, mutta koska virranoptimoijat asennetaan pareittain tai yksittäisiin paneeleihin, niiden optimointi on tuotannon kannalta paljon tehokkaampi. [30.]

MPPT-säätimet voivat olla tehokkaita sellaisissa tilanteissa, joissa voimala ei ole liian suuri ja on hyvin vähän varjostusta tai riskejä paneelien hajoamisiin. Myös pienemmät ketjut voivat auttaa MPPT-säätimiä olemaan parempi vaihtoehto. Kuvassa 7 on aurinkovoimalaan kytkettävä MPPT-säädin.

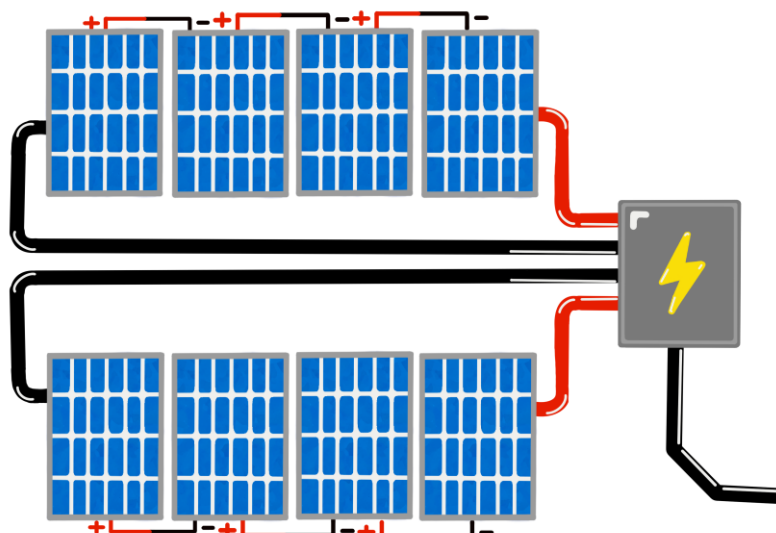


Kuva 7. MPPT-säädin aurinkovoimalaan [31].

## 2.2 String-invertteri-järjestelmän toiminta

String-invertteri-järjestelmä, suomeksi käännettynä ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmä, on aurinkovoimaloille yleinen yksinkertaisempi aurinkosähköjärjestelmän malli. Tässä aurinkosähkövoimalatyypissä vaihtosuuntaajaan kytketään useita ketjuja, jotka koostuvat useista sarjaan- tai rinnankytketyistä aurinkopaneeleista. [32.] Ketjujen toiminta perustuu vaihtosuuntaajan suurimpaan mahdolliseen muuntokapasiteettiin. Koska aurinkopaneelit tuottavat tasavirtaa, vaihtosuuntaajan on muunnettava aurinkopaneelien tuottaman sähkö vaihtovirraksi, jota sähköverkossa käytetään. Tyypillisesti aurinkopaneelit kytketään sarjaan, mikä tarkoittaa sitä, että vaihtosuuntaajan on muunnettava kokonaisen ketjun yhteenlaskettu virta ja jännite. Tämä asettaa vaihtosuuntaajalle paljon vaatimuksia, kuten korkeat maksimijännitteet ja -virrat, joista voi koitua paloturvavariski.

Kuvasta 8 voidaan havaita aurinkopaneelit, ketjujen sähköjohdot ja vaihtosuuntaaja. Paksulla piirretyt vaihtosuuntaajaan kulkevat viivat ovat ketjun johtoja, eli stringejä. Esimerkki on sarjakytkennästä, jossa jokaisessa paneelissa on tyypillisesti yksi positiivinen ja negatiivinen virtajohto.



Kuva 8. Ketjuvaihtosuuntaaja-tyyppinen järjestelmä yksinkertaistettuna.

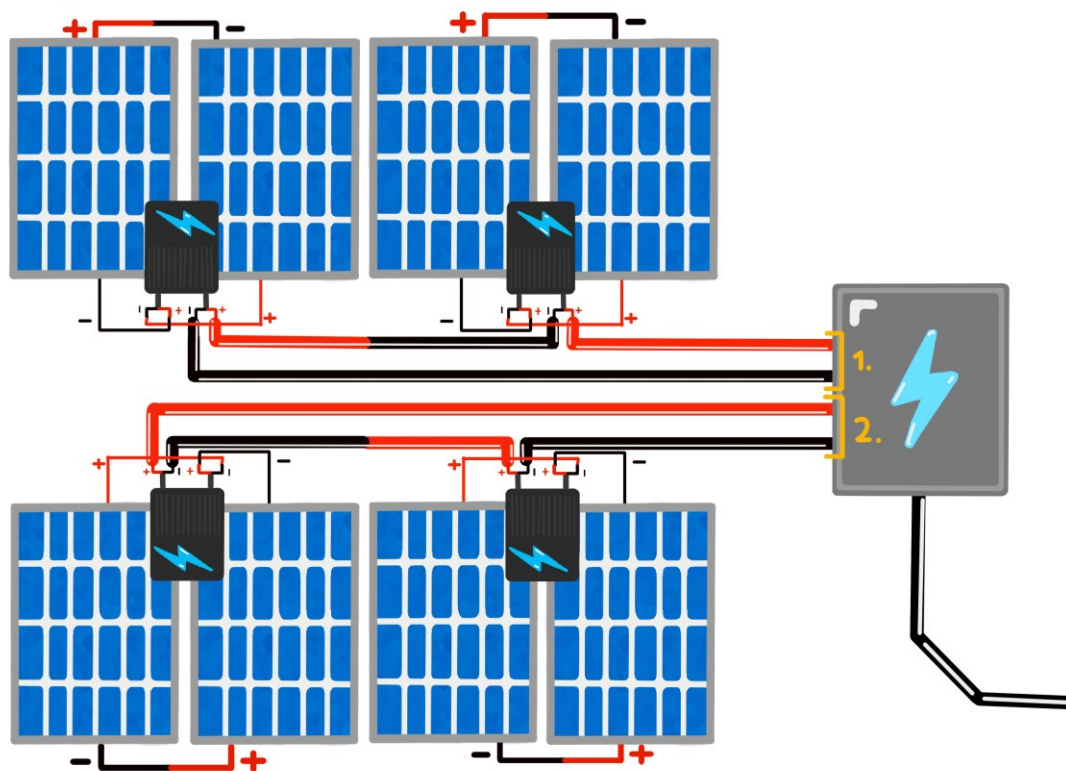
Tässä työssä etsitään johtavia syitä palojen syttymiseen aurinkosähköjärjestelmissä. Ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmissä on usein suuria jännitteitä, mikä saattaa aiheuttaa suurempaa syttymisriskiä. Vian mahdollisuudet johtaa tulipaloon ovat kuitenkin yleisesti erittäin pieniä. Luvussa 4 tarkastellaan tarkemmin tulipalojen statistiikkaa.

### 2.3 MLPE-järjestelmän toiminta

MLPE tulee englannin kielestä Module-level power electronics, eli modulaarisen tason elektroniikka. Modulaarisiin elektroniikkalaitteisiin kuuluu mikrovaihtosuuntaajat, MPPT-säätimet ja virranoptimoijat. [33.] MLPE-tekniikkaa käyttävän järjestelmän suurimmat edut ovat tarkka tuotannon valvominen, paremmat sähkötuotannot ja turvallisemmat virtojen suuruudet sekä sarjaan kytkettyjen paneelien jatkuva toiminta yksittäisten paneelien vikaantumisien ilmaantuessa. [34.]

Alla olevasta kuvasta 9 nähdään yksinkertaistettuna kaksi ketjuun asennettua neljän paneelin riviä sarjaan kytkettyinä. Vaihtosuuntaajan päällä on merkittynä oranssilla eri ketjujen numerot. Jokaisella paneelilla on aina plus- ja miinus-

merkkiset johdot, jotka kytetään paneelipariin ja virranoptimoijaan kiinni. Virranoptimoijat ovat kiinnitettyinä paneelien alla. Selkeyden vuoksi virranoptimoijat on piirretty paneelien väliin niiden päälle. Kaavio on yksinkertaistus, eikä se kuvaa ketjujen todellisia suuruksia paneelimäärissä.



Kuva 9. MLPE-tekniikkaa käyttävän järjestelmän yksinkertaistettu toiminta.

### 3 Aurinkosähkövoimaloiden turvallisuus

Aurinkovoimaloiden turvallisuutta voidaan tarkastella palo-, sähkö- ja asennusturvallisuuden näkökulmasta. Aurinkosähkövoimaloiden turvallisuutta tarkastellaan seuraavissa luvuissa näistä näkökulmista.

#### 3.1 Sähöturvallisuus

Sähöturvallisuus liittyy suurimmilta osin käyttöturvallisuuteen. Kiinteistöissä toimivat energiantuotantotavat ovat valvottuja järjestelmiä, joilla on Suomessa tar-

kat vaatimukset. Sähköturvallisuuden osalta olennaista on asianmukainen suojaus, eristys ja maadoitukset. Suomessa vaaditaan myös tasavirtapuolelle turvakytkin ennen vaihtosuuntaajaa, jotta voimalan voi kytkeä pois päältä. Vaihtosuuntaajan jälkeen asennettava ylijännitesuoja ja vaihtovirtakytkin ovat vapaaehtoisia, mutta suositeltavia. [24, s. 11.]

### 3.1.1 Ylivirtasuojaus

Aurinkosähkövoimaloihin on asetettu standardien mukainen ylivirtasuojausvaatimus. Ylivirta voi muodostua, jos aurinkopaneeleissa ilmenee oikosulku tai johtimien ja maadoituksen vika. Ylivirta voi muodostua myös liitännäsiassa ja liitännätakeskuksessa. Paneeliketjujen ylivirtasuojaus vaaditaan vain siinä tilanteessa, missä paneeliketjua suojaavan ylivirtasuojalaitteen mitoitusvirta  $I_n$  täyttää sille asetetut ehdot. Nämä ehdot on asetettu kaavoina standardissa SFS IEC 62548:2016:fi. [25, s. 31–32.] Lisäksi järjestelmän tasajännitteen ylittäessä 50 V:n on käytettävä ohitusdiodeja [25, s. 39].

### 3.1.2 Maadoitus ja sääolosuhteilta suojaus

Sääolosuhteiden vuoksi on mahdollisesti suojauduttava salaman eli ylijännitteen vaikutuksilta. Aurinkosähköjärjestelmät eivät vaikuta merkittävää määrää salamaniskujen yleisyyteen tai kohteeseen, joten sen suojaamiselle ei ole veloitetta. Vaikka rakennuksessa ei olisi ollenkaan salamasuojausta, voimalan ylläpitäminen tai omistaminen ei vaadi salamasuojajärjestelmää. [25, s. 36.]

Maadoitus on sähkötekkinen keino tasata sähköjärjestelmän potentiaali. Se on yleinen turvatoimenpide, kun järjestelmällä on vaara aiheuttaa ihmiselle sähköisku. Aurinkosähköjärjestelmässä maadoitusta pidetään yhtenä järjestelmän komponenttina. Oikosulun sattuessa se voi suojata järjestelmää ylivirralla. [25, s. 51; 35]

Huolellisesti suunniteltu, asennettu ja ylläpidetty aurinkosähkövoimala on lähtökohtaisesti turvallinen eikä aiheuta suurta riskiä tulipalolle tai sähköiskulle [36.]. Hyvään sähköturvalliseen voimalaan kuuluu seuraavat piirteet ja toimenpiteet:

- mahdollisimman lyhyitä reittejä kulkevat tasavirtakaapelit
- vaihtosuuntaaja mahdollisimman lähelle sähkökeskusta (kuivaan sisätilaan)
- induktiosilmukoiden välttäminen johdotuksessa
- kunnolliset ja selkeät opasteet ja varoitustarrat
- käyttöönottotarkastus
- laadukkaat ja asianmukaiset komponentit. [27 s. 20.]

### 3.1.3 Komponenttien kestävyys

Asianmukaisten komponenttien valinta on olennainen osa paneelien sähköturvallisuutta. Aurinkosähköpaneelisto ja sen komponentit ovat jatkuvasti sään olosuhteiden vaikutuksen alla, ja niiden on siksi kestävä ympäristön aiheuttama kuormitus, kuten UV-säteily, tuuli, vesi ja lumi. Erityisen tärkeää on vesitiivisyys kaapeleiden ja liitosten välillä sekä paneelien tukirakenteissa. [25, s. 37.]

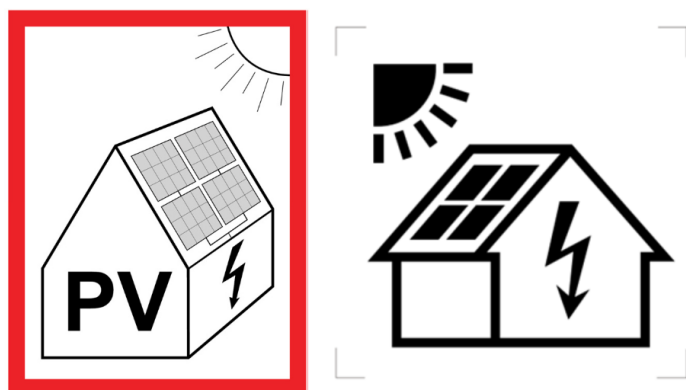
Väitteitä virranoptimoijien vaarallisuudesta on esitetty tasavirtaliitinten kritiikkinä, sillä liitosten lisääminen tasavirtajärjestelmään on vältettävä. Toisaalta liitinten ongelmana voi olla myös ylikuumeneminen, joka voi johtua esimerkiksi liian suuresta jännitteestä tai virrasta. Koska virranoptimoijien tehtävä on optimoida tasavirran suuruutta, asianmukaisten liittimien ja asennuksen ei pitäisi vaikuttaa negatiivisesti palo- tai sähköturvallisuuteen. Virranoptimoijien tärkeimpiin tehtäviin kuuluu valokaaritunnistus ja liitinten valvominen, joiden ansiosta vaaratilanteet liitinten vikaantumisista minimoidaan. Tulipalon syttymisen riski pienenee jännitteen automaattisesti laskiessa turvalliselle tasolle.

Komponenttien paloturvallisuus on tärkeä osa järjestelmän turvallisuutta, minkä vuoksi niiden kehittäminen kuumiin olosuhteisiin on otettu huomioon suunnitte-

lussa. Esimerkiksi vaihtosuuntaajille on tärkeää pysyä optimaalisessa lämpötilassa oikosulkujen ja valokaarien estämiseksi. Useat valmistajat ottavat käyttöön vaihtosuuntaajien monitoroinnin useilla eri antureilla varmistaakseen turvallisen toimintaympäristön. Esimerkiksi Refusol 17K -vaihtosuuntaaja sisältää jäähdytysjärjestelmän, joka pitää laitteen ympäristöä vain 10 °C kuumempana. Tuuletinten huono puoli on, että ne ovat kuluvia liikkuvia osia, jotka voivat hajota. Kalleissa järjestelmissä voitaisiin jopa käyttää laitteiden nestejäähdytystä hyödyksi kiinteistön lämmittämiseen hukkalämmön minimoimiseksi. Nestejäähdytys tosin vaatisi suurempaa aurinkovoimalaa ja voimakkaita vaihtosuuntaajia tehdäkseen konseptista rahallisesti järkevän. [37, s. 98.]

### 3.1.4 Turvallisuusmerkinnät

Aurinkosähköjärjestelmän asennuksesta on ilmoitettava tarralla tai lapulla kiinnitettynä sähköasennuksen liittymiskohtaan, energian mittauskohtaan sekä sähköpääkeskukseen. Tällä pyritään huolto- ja pelastushenkilökunnan turvallisuuden varmistamiseen. Alla olevassa kuvassa 10 on esimerkki turvallisuusmerkinnästä. [10.]



Kuva 10. Aurinkosähköjärjestelmän varoitustarra [10; 25].

Varoituskilpiä voidaan halutessa lisätä myös tasa- ja vaihtosähköturvakytkeisiin sekä kenttäkoteloihin [38].

## 3.2 Paloturvallisuus

Paloturvallisuus on erittäin tärkeä osa aurinkovoimaloiden turvallisuutta, sillä mahdolliset tulipalot voivat olla kiinteistön tai ihmisten kannalta katastrofaalisia. Tulipalon riski on aina olemassa, mutta Suomessa tulipalon aiheutuminen aurinkosähköstä on kuitenkin erittäin matala. Paloturvallisuus korreloi vahvasti sähköturvallisuuden kanssa, sillä suuret kuormittavat sähkövirrat voivat aiheuttaa tulipaloon johtavaa lämpöä. [39.]

Tanskalaisessa yliopistossa tehdyn tutkimuksen perusteella havaittiin, että aurinkopaneeleilla voi olla suuri vaikutus palon leviämiseen katolla. Palon syttyessä siis muusta kuin aurinkosähkövoimalasta aurinkovoimala voi tahattomasti edistää tulipalon leviämistä luomalla palamisreittejä tulen leviämiselle. [36, s. 8.]

Paloturvallisuus jakautuu paloluokituksen mukaan. Rakennuksissa käytetään yleisesti paloluokitusta P0–P3. Luokat perustuvat rakennuksen tyyppiin ja sen ominaisuuksiin. Tarkastellaan aurinkosähköturvallisuuden kannalta tärkeimmät paloluokat. P1-luokan rakennukset ovat merkittäviä aurinkosähkön kannalta, sillä suurin osa katoilla sijaitsevista paneeleista on tämän luokituksen alla. P1-luokan rakennuksiin, kuten varastorakennuksiin, ostoskeskuksiin, hoitolaitoksiin ja teollisuusrakennuksiin, mahtuu suuri määrä ihmisiä. Näissä rakennuksissa on erityisen tärkeää huomioida poistumistiet. Järjestelmän osat tulee oltava etäällä uloskäytävistä, poistumisreiteistä sekä varateistä. Näissä rakennustyypeissä on tiukimmat säädökset materiaalin syttyvyydelle. [36, s. 12.]

P3-luokan rakennukset ovat toiseksi merkittävimpiä aurinkovoimaloiden paloturvallisuuden kannalta. Näihin rakennuksiin kuuluvat omakotitalot ja vastaavan kokoiset vapaa-ajan asunnot. Näissä rakennustyypeissä vaatimukset keskittyvät lähinnä aurinkosähköturvallisuuden paloeristykseen. Julkisivupintojen ja paloturvallisuusmääräysten vaatimukset ovat suhteellisen matalat. [36, s. 12–13.]

### 3.2.1 Materiaalien vaatimukset

Paloriskien hallitsemiseksi käytetään aurinkovoimaloiden komponenteissa standardien mukaisia materiaaleja. Lisäksi Suomessa on standardisoitu testimenetelmiä eri osien turvallisuuden varmistamiseksi. Vuoden 2022 standardin SFS 6000 painoksen (pienjännitesähköasennukset) mukaisesti aurinkosähköjärjestelmien vaihtosuuntaajan ja vaihto- sekä tasavirtakytkimien on oltava palamatonta materiaalia, kuten esimerkiksi sementtikuitua. Rakenteen tulee myös olla palamatonta materiaalia tai alustettu asianmukaisesti samanlaisesta palamattomasta materiaalista. Tilanteessa, jossa rakenteiden vaatimus ei täyty, on rakennettava vapaa tuulettava tila palavan rakenteen ja asennusalueen välille. [36, s. 7.]

Korroosion, eli metallin hapettumisen vuoksi on käytettävä korroosiota estäviä materiaaleja aurinkovoimalan tukirakenteissa, liitoksissa ja paneelin kehyksissä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi alumiini, galvanoitu teräs tai käsitelty puu. Liitosten korroosionesto materiaalit voivat olla esimerkiksi nylonia tai kumieristeitä. Näissä on otettava huomioon kumin ikääntyminen voimalan ikääntyessä. Eri materiaalit ikääntyvät eri tavalla, jolloin eristeiden tai tiivisteiden korvaaminen on mahdollista. Hapertunut tiiviste voi hyvinkin aiheuttaa oikosulkua järjestelmässä veden päästessä liitosten väliin. [25, s. 25.]

Korroosionestoon on käytössä luokitukset, jotka määrittävät korroosioneston voimakkuuden. Luokituksia on eri käyttöön: esimerkiksi alumiinille ja ruostumattomalle teräkselle käytetään eri merkkejä luokkien niminä. Alumiinille luokat ovat C1–C5, kun taas ruostumattomalle teräkselle luokitukset ovat I–V. [40; 41.]

### 3.2.2 Henkilökunnan turvallisuus palotilanteessa

Riskien hallinnassa tärkeää on myös osata varautua mahdollisiin paloihin. Pelastustoiminnan näkökulmasta on välttämätöntä tietää kiinteistössä mahdollisesti sijaitsevasta aurinkosähkövoimalasta sekä sen palosuunnitelmasta. Henkilökunnan terveyden ja turvallisen työskentelyn kannalta hyvin toteutettu palo-

suunnitelma voi olla ratkaiseva tekijä kiinteistön pelastamisen kannalta. Sammuttaminen on aina vaikeaa sähkön kanssa, koska vesi johtaa sähköä erinomaisesti. Aurinkopaneeleja ei voi pysyvästi sammuttaa, koska valosähköreaktio tapahtuu aurinkokennoissa fysikaalisena ilmiönä. Turvakytkimet sammuttavat tasa- ja vaihtovirrat, mikä kuitenkin helpottaa pelastushenkilökuntaa huomattavasti. Turvallisuutta voidaan parantaa sammuttamisen kannalta erotuskytkimillä, jotka jakavat sarjaan kytkettyjä paneeliketjuja pienempiin, jotta jännite saadaan laskettua turvallisemmalle tasolle. Myös liittimien avaaminen voi auttaa, mutta se luo vaaran sähköiskulle. Henkilökunnan, eli palon sammuttajien ja kiinteistössä asioivien turvallisuus on kuitenkin aina ensimmäinen prioriteetti palojen sammuttamisessa. [36, s. 7,16.]

### 3.2.3 Tulipalon sammuttaminen ja jälkitoimenpiteet

Sammutustyötä hankaloittaa laaja pinta-ala, jonka aurinkosähköjärjestelmä kattolla vaatii. Palomiesten kalusto ja vesi ovat hankalia hallita voimalan lähettävillä. Sammuttamisen jälkeen on aina varmistettava uudelleensyttymisen riskien varalta koko voimala. Jos syttymisen syy voidaan todeta, uudelleensyttymisen estäminen helpottuu huomattavasti. Satakunnan ammattikorkeakoulun tekemässä tutkimuksessa todettiin, että vaurion ollessa osittainen, voi järjestelmä pahimmillaan sytyttää uuden tulipalon. [42.] Tämän vuoksi on tärkeää varmistaa palamaisen sammuttua, että voimala on turvallinen korjata ja kytkeä lopullisesti pois päältä. Lopullinen poiskytkentä sisältää liitosten purkamista toisista paneeleista tai laitteista.

Lisävaurioiden ja turvallisuusriskien toimenpiteet ovat standardisoituja. Jälkitoimenpiteinä suositellaan aloittamaan sulkuvyöhykkeiden perustaminen, joiden tehtävä on osastoida voimalaa syttymisen varalta. Helposti syttyvät asiat on poistettava voimalan läheisyydestä. Oikosuluista tai valokaarista syttyvä materiaali voi levittää tai aloittaa uuden tulipalon. Yöaikaan sattuneessa tapaturmassa on huomioitava auringonnousu, joka nostaa järjestelmän jännitettä ja virtaa merkittävästi. Tämä luo pelastushenkilökunnalle sähköiskuvaaran. [43, s. 20.]

Standardin mukaiset toimenpiteet aurinkosähköjärjestelmän turvalliseen tilaan saattamiseen ovat seuraavanlaiset:

- järjestelmän kytkimien sulkeminen. Kaikki voimalassa olevat kuormane-rotuslaitteet pitää myös sulkea. Udelleenkytkennän estäminen esimerkiksi varoituskyltillä tai ohjelapulla
- tarkastetaan eristämättömien osien ja maadoituspotentiaalın väliset vaaralliset jännitteet
- eristämättömät johtimet erotettava muusta järjestelmästä
- erotetaan järjestelmää mahdollisimman pieniin osiin liittimiä purkamalla virran tarkistuksen jälkeen. [43, s. 20.]

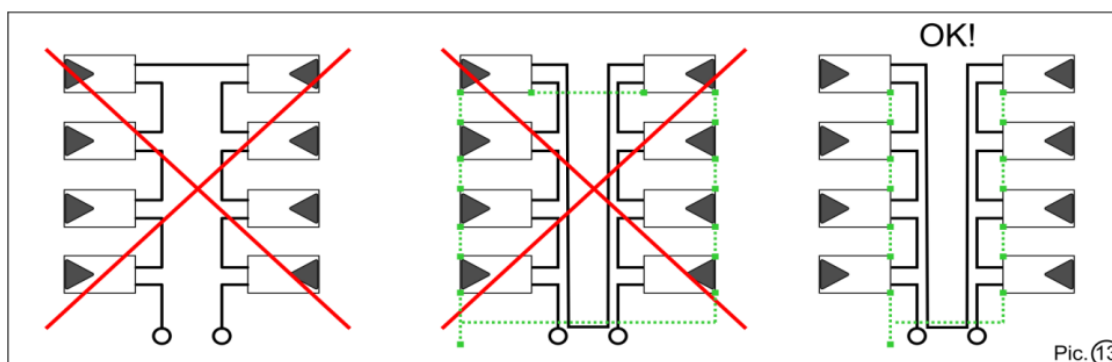
### 3.3 Asennusturvallisuus

Asennusturvallisuus koskee paneelien asentajia ja asentajien tekemän työn laatua. Huolellisesti ja asianmukaisesti asennettu aurinkovoimala on turvallinen. Asentajien on otettava huomioon pieniäkin yksityiskohtia voimalan asentamisessa, kuten johdon tiukkuus kulmassa tai tasavirtakaapeleiden sovittimien tiukkuus.

Standardin SFS IEC 62548:2016 luku 6.6.2.1 käsittelee johtojen asennusturvallisuutta. Tasasähkökaapelit on niputettava siten, etteivät johdot laahaa maata. Silmukoiden muodostumisen välttämiseksi pääkaapelin positiiviset ja negatiiviset tasasähköjohdot tulee olla niputettuna paneelin reunaan. Silmukat johdoissa voivat aiheuttaa voimakasta induktiota ylivirran sattuessa. Pitkät tasasähkökaapelit (pituudeltaan noin 50 metriä) on asennettava maadoitettuun metalliseen asennusputkeen tai kanavaan, joka on kytketty potentiaalitasaukseen. Jos mahdollista, pitkät johdot tulisi asentaa maan alle. Tämän lisäksi kaapeliin on lisättävä ylijännitesuoja. [25, s. 36.]

Virranoptimoijat lisäävät asennusturvallisuutta laskemalla asennusjännitteen yhteen volttiin. Koska aurinkopaneeleja ei koskaan voi todellisesti sammuttaa, on asennuksessa aina vaarana saada sähköisku. Virranoptimoijat laskevat vaarallisen jännitteen asennusjännitteeseen, kunnes ne tunnistavat vaihtosuuntaajan kytkennän. Vaihtosuuntaajan asentaminen vaatii vähintään S2-tason (tai vastaavan tason) sähkötyöluvat [10]. Vasta vaihtosuuntaajan asennuksen jälkeen optimoijat tunnistavat ja voivat kommunikoida vaihtosuuntaajan kanssa, jolloin jännite nousee tuotannon tasolle. [44.]

Tasavirtakaapeleille on määritelty ohjeet optimipituuksien saavuttamiseksi. Tasavirtakaapeleiden optimointi alkaa vaihtosuuntaajan sijoittamisesta. Mitä lyhyempi reitti, sitä vähemmän liitoksia ja kulmia tulee vastaan johtojen liittämässä. Turvallisuuden kannalta tärkeää on mahdollisimman pieni määrä liitoksia ja lyhyet johdot. Paneelien paluukaapelit tuodaan samaa reittiä takaisin silmukoita välttämällä. Kuvassa 11 on johtoreittien optimoinnin opas. [24, s. 14.]



Kuva 11. Johtoreittien optimoinnin opas [24, s. 14].

Johtojen reitittämiseen on myös paloturvallisuusstandardin mukaisia ohjeita kaapelien reititykseen suhteessa voimalan kulkuväyliin, missä tulee huomioida rakennuksen pelastussuunnitelma. Katolla sijaitseville kulkuväylille on järjestettävä vähintään kaksi poistumistietä siltä varalta, että tulipalo katkaisee pelastushenkilökunnalta reitin. Aurinkovoimalan kokoonpanopiirustus alkaa kulkuväylien

järjestämisestä kaikkiin nousujohtoihin sekä savuluukkuihin. Tämän jälkeen paneelistot jaetaan osiin siten, että ne ovat korkeintaan 40 metrin suuruisia. [43 s. 11.]

### 3.4 Ylläpito

Tulipalon ehkäiseminen on verrattain helpompaa kuin tuhojen korjaaminen. Tästä syystä ylläpitoa voidaan pitää tärkeimpänä ehkäisevänä toimenpiteenä aurinkosähkövoimaloiden paloturvallisuuden kannalta. Ylläpidolle on myös olemassa käytettäviä standardeja, joiden mukaisesti voimalasta on pidettävä huolta. Ylläpidossa tulee olla huoltosuunnitelma, jossa voimalan kuntoa tarkkailaan jatkuvasti. Huoltosuunnitelmaan sisältyy voimalan tarkastusvälit ja herätteet. Tarkastusvälien suuruuksiin voi vaikuttaa järjestelmän tyyppi (maa-asennus, teollinen asennus tai kotitalous), etävalvonnan mahdollisuus, sopimuksen ehdot, valmistajan suositukset, laitoskohtaiset ominaisuudet ja kustannus-hyöty-analyysit. [44.]

Laitteiden valmistajista riippuen huoltotoimenpiteet voivat sisältää vaihtosuuntaajien huoltamista, paneelien kiinnikkeiden, sulakkeiden ja pistokkeiden vaihtoa. Komponentit on vaihdettava käyttäen saman valmistajan samoja tai vastavia komponentteja. Tarkastuksen tekeminen ei aina vaadi ammattihenkilöä. Aistinvaraisia ja silmämääräisiä tarkastuksia voi tehdä myös voimalan omistaja. Tarkastuksessa on kuitenkin otettava huomioon turvallisuustoimenpiteet sähköiskun välttämiseksi. Ammattipätevyyttä omaamaton henkilö ei saa fyysisesti tarkastaa aurinkojärjestelmän kuntoa turvallisuussyistä. Fyysisellä tarkastuksella tarkoitetaan komponentteihin koskemista. [45, s. 12.]

OP Pohjolan aurinkosähkövoimaloiden suojelusohjeen S950:n mukaisesti tee se itse -tarkastuksia voidaan suorittaa itse voimalan ollessa pois kytkettynä. Lumikuorman tai lian poistaminen paneeleilta on mahdollista toteuttaa itse, mutta tarkastuksen suorittaminen itse tulee kuitenkin varmistaa ensin valmistajalta tai asentajalta. [46, s. 4.]

Aurinkovoimalan ylläpitoa helpottaa vesisade, joka aktiivisesti puhdistaa likaisia tai pölyisiä paneeleja. Erityisen hankalissa paikoissa sijaitsevilla aurinkovoimaloilla voi olla tarpeen puhdistaa paneelit, kuten erittäin hiekkaisessa tai pölyisessä kuivassa paikassa. Optimaalisen tuotannon varmistamiseksi ylläpidon on varmistettava esteetön auringonsäteen pääsy aurinkokennoihin. Lumen sulettua keväisin on syytä suorittaa vähintään silmämääräinen tarkistus asennustelineiden ja kaapeleiden eheyden varmistamiseksi. Liitäntärasioiden tarkastaminen on myös järkevä vaihtoehto kosteuden valvomisen vuoksi. Tämän toimenpiteen saa suorittaa vain henkilö, jolla on sähköturvallisuustutkinto 1 tai 2. [24, s. 29.]

### 3.5 Globaali turvallisuus

Muulla maailmassa turvallisuusluokitukset ovat yleensä alhaisemmat kuin Suomessa. EU:ssa aurinkosähköjärjestelmille on useita standardeja eri standardijärjestöiltä, kuten ISO, IEC, CE, MCS ja UL [47]. Yhdysvalloissa käytetään NEC-standardia (eng. National Electrical Code), jonka mukaisesti rakennetaan turvalliset aurinkosähkövoimalat. NEC on Yhdysvalloissa toimivan paloturvallisuusyksikkö NFPA:n laatima, ja se käsittelee aurinkosähköturvallisuuden lisäksi muitakin sähköasennuksia. Yksi merkittävä NEC:n vaatimus aurinkosähköjärjestelmille Yhdysvalloissa on RSD-valmius, eli järjestelmän nopea sulkeminen. Tämän säännön mukaan voimala pitää olla suljettavissa 30 sekunnissa. Tämä onnistuu ainoastaan MLPE-tekniikkaa hyödyntämällä [48, s. 69; 49].

Muulla maailmalla esitetyt turvallisuusvaatimukset aurinkovoimaloille voivat poiketa Suomesta ja Euroopasta olosuhteiden vuoksi. Esimerkiksi Aasiassa olosuhteet ovat kosteammat ja kuumat, mikä rajoittaa moduulien elinikää. Infrastruktuurin taso on joissain Aasian maissa matala, minkä vuoksi turvallisuuteen ei aina osata kiinnittää tarpeeksi huomiota. [50.]

## 4 Turvallisuuden vertailu ja statistiikka

Tutkimuksen hypoteesi oli, että MLPE-tekniikkaa hyödyntävät aurinkosähköjärjestelmät ovat statistisesti paloturvallisempia kuin tavalliset ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmät. Hypoteesin muodostaminen perustui internetistä saatuun dataan ja kirjoittajan omaan kokemukseen järjestelmien asennuksesta sekä suunnittelusta. Datan kerääminen Suomesta on hankalaa, sillä aiheesta ei ole tehty paljoa tutkimusta. Tietoa löytyy sekä yksityisiltä yrityksiltä että valtion Pelastustöiden resurssi- ja onnettomuustilastotietokanta Prontosta. Aineiston analyysissä on hyvä pitää mielessä, että osa lähdeaineistosta ei ole ammattitaitoisen henkilön tuottamaa. Tuloksissa on aina olemassa epävarmuus, kun tietoa kerätään monista eri lähteistä ja tiedon alkuperä perustuu arvioon. Esimerkiksi palojen syttymissyöt ovat vaikeita tutkia, minkä vuoksi datassa ilmenee arvioita ja epävarmuuksia. Tutkimuksen tarkoitus oli kerätä tietoa monesta eri lähteestä ja saada suuntaa antava tulos aurinkovoimaloiden vikaantumisten syistä. Tietoa kerättiin muualtakin kuin Suomesta, mutta sitä käsitellään erikseen eikä sekoiteta Suomesta saatuun statistiikkaan.

### 4.1 Aineiston keräys

Kerätyssä aineistossa ilmeni vaihtelevuuksia, sillä sitä ei aina ollut saatavilla samassa muodossa ja yhtä laajasti. Osassa lähteistä ei annettu sattuneiden tapaturmien vuosista tietoa ollenkaan, kun taas toisissa ei ollut tutkittu palon syttymisen syytä tarkasti. Vertailuun tarvittavaa dataa haettiin sekä julkisista tietolähteistä että yksityisiltä tahoilta, kuten yrityksiltä ja toiminimiyrittäjiltä. Tietojen käsittelyyn ei vaadittu arkaluontoista dataa, kuten yritysten nimiä, osoitteita, henkilötietoja tai muuta vastaavaa yksityistä tietoa. Tutkimuksen kannalta olennaista oli vikaantumisten määrä, ajankohta ja syy sekä syiden määrät.

Suomesta haettavaa dataa kysyttiin vakuutusyhtiöistä, energiajärjestöistä, pelastuslaitokselta ja yksittäisiltä energia- ja talotekniikan toiminimiyrittäjiltä. Potentiaalisimmat tiedonlähteet saatiin pelastuslaitoksen vanhasta tietokannasta

Prontosta, jonne kirjataan palotutkijoiden kommentteja syttymissyistä ja tulipalon tapahtumien kulusta.

Ulkomailta kerätty data saatiin julkisista tilastoista eikä siihen tarvittu erityisiä lupia tai hakemuksia. Tärkeimpänä tiedonlähteenä oli saksalainen tutkimus aurinkosähköjärjestelmien tulipaloista maailmanlaajuisesti. Tämän saksalaisen tutkimuksen data oli hankittu kyselyillä ja haastatteluilla. Tutkimuksessa saatavilla oleva data ei ole absoluuttisina lukuina, vaan diagrammeina ja kaavioina. Tästä syystä niiden tarkka tulkitseminen ei ollut mahdollista. On kuitenkin tärkeää huomioida, että laajojen tutkimusten myötä yksittäiset tapaukset eivät välttämättä ole tilastollisesti merkittäviä. Vikaantuvuudessa on tärkeää tietää syiden suhteellinen määrä, sillä sen avulla voidaan paikallistaa järjestelmän suurimmat heikkoudet. Ulkomailta hankittua dataa yritettiin myös saada suurista aurinkosähkölaitteita valmistavista yrityksistä, kuten SolarEdgeltä ja Froniukselta, mutta yrityksillä ei ollut julkisesti jaettavaa aineistoa tästä aiheesta.

Tiedon saantiin vaikuttavia tekijöitä oli monia. Työn aikataulu oli tiukka, minkä vuoksi osa potentiaalisesti saatavasta datasta ei ehdi koskaan käsittelyyn. Tiedon kerääminen vaatii enemmän aikaa ja resursseja laajaa tutkimusta tehdessä. Aiheesta ei ollut paljoa tutkimusta, sillä aurinkosähkötكنولوجيا on yhä uutta sekä kehittyvää ja yksityisen tiedon saaminen osoittautui haastavaksi. Yrityksillä on usein valtavat tietojärjestelmät, joista tiedon kaivamisessa ja aiheesta tietävien ihmisten etsiminen vie aikaa. Aineistoa pyytäessä tehtiin selväksi, että työn ei ole tarkoitus olla kaupallisesti tuotollinen, vaan kerätä yleistä tietoa anonymisti ja yrittää tehdä johtopäätöksiä epäarkaluontoisesta aurinkosähköjärjestelmien tulipalojen aineistosta. Tämän tiedon tuli käydä ilmi aineistoa pyytäessä, koska yritykset eivät välttämättä auta tiedon keräämisessä, jos siitä on kaupallista hyötyä kilpailijalle.

## 4.2 Aineiston käsittely

Seuraavat luvut sisältävät kerätyn datan ja tulokset. Aineiston analysoinnissa ja visualisoinnissa on käytetty Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, ja diagrammit

sekä kaaviot on tehty sen avulla. Taulukkoihin syötetyt tiedot löytyvät liitteistä 1 ja 2. Analyysissa on myös otettu huomioon aineiston luovuttajien toivomukset datan julkistamisesta yritysten nimillä.

#### 4.2.1 Aurinkosähkövoimaloiden vikaantuminen Suomessa

Suomessa vikaantuneiden aurinkosähkövoimaloiden määrä on pieni. Tulipaloja aiheuttaneiden voimaloiden määrä liikkuu Pronton tietojen mukaan muutamassa kymmenessä. Tulipalojen tutkiminen on vaikeaa, minkä vuoksi syttymisen syistä joudutaan tekemään arvioita. Arvioiden perusteella voidaan kategorisoida syttymisien syitä eri aurinkovoimalan osiin, mutta silloinkin pienestä datasta ei voi tehdä suoraa johtopäätöstä. Pelkästään Suomesta saadun aineiston pohjalta ei siis välttämättä voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä. MLPE-tekniikkaa koskevan turvallisuuden vertailuksi on siis haettava tukevaa aineistoa muualta maailmasta ja sähköturvallisuuden teorian puolelta. Tapaturmien määrä on pieni ja niiden syttymissyiden tutkinta vähäistä. Osasyynä tähän on aurinkosähkön vasta tällä vuosituhanella noussut suosio sekä Suomessa että maailmalla.

Alla olevasta kuvaajasta (kuva 12) nähdään Suomesta kerättyä dataa aurinkosähkövoimaloiden aiheuttamiksi epäilyistä tulipaloista vuosilta 2016–2023. Nämä on kategorisoitu kuitenkin vain epäilyiksi, sillä arvion palon syttymissyystä on voinut tehdä palohenkilökunnan jäsen ilman kunnollista palon syttymisen tutkintaa. Nämä kirjatut tapahtumat ovat kuitenkin todennäköisesti aurinkovoimalan aiheuttamia. Kuvassa 12 havaittavat siniset pylväät kuvaavat rakennuspaloja, eli toteutunutta paloa. Näissä tapauksissa tulipalo on tuhonnut kiinteistöä merkittävästi leviämällä syttymiskohdasta muihin rakenteisiin. Punaisella värillä olevat pylväät tarkoittavat rakennuspalovaaraa, eli tulipaloa, joka ei ole levinnyt syttymiskohdasta, mutta on aiheuttanut kiinteistölle vaaraa kehittyä rakennuspaloksi.

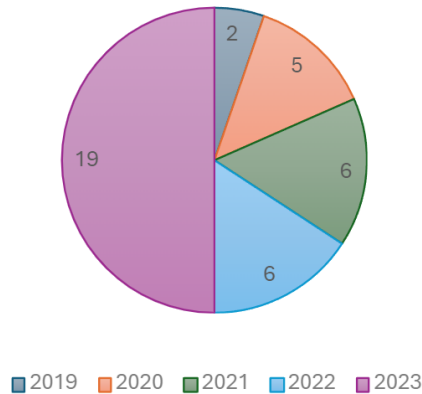


Kuva 12. Aurinkosähkövoimaloiden aiheuttamiksi epäillyt tulipalot 2016–2023 [51].

Tärkeä havainto kuvasta on se, että tulipalojen määrä kasvaa vuosi vuodelta enemmän. Tämä johtuu aurinkosähkön kasvavasta suosiosta Suomessa, mikä kasvattaa samalla tuhoisien tulipalojen riskien määrää. Tästä datanäytteestä ei voida vetää johtopäätöksiä MLPE-tekniikan turvallisuudesta, koska syttymisen syitä ei ole tutkittu. On kuitenkin tärkeää huomioida, miten vikaantumisten määrä kasvaa rajusti aurinkovoimaloiden yleistymisen myötä. Laitteiston ikään-  
tymisellä voi myös olla vaikutus esimerkiksi liitinten kestävyyteen. [51.]

Prontosta saatua täsmentävää aineistoa saatiin vuosilta 2019–2023. Aineiston saaminen oli haastavaa, koska pelastuslaki estää järjestelmään pääsyn asianomaamattomilta kansalaisilta. Pelastushenkilökunta ja järjestelmän ylläpito-  
henkilökunta voivat kuitenkin pyynnöstä hakea aineistoa ja toimittaa sen ane-  
tuilla hakukriteereillä. Tässä tapauksessa kriteerit olivat hakusanoja aurinkosäh-  
köön liittyen. Järjestelmästä tiedon saaminen osoittautui haastavaksi täsmälli-  
sen hakumenetelmän vuoksi, ja siitä oli poistettava asiaan liittymättömät ta-  
paukset. Alla olevassa ympyrädiagrammissa (kuva 13) esitetään Prontosta saa-  
dun aineiston mukaisesti aurinkosähkövoimaloiden vikaantumisten lukumäärät vuosittain.

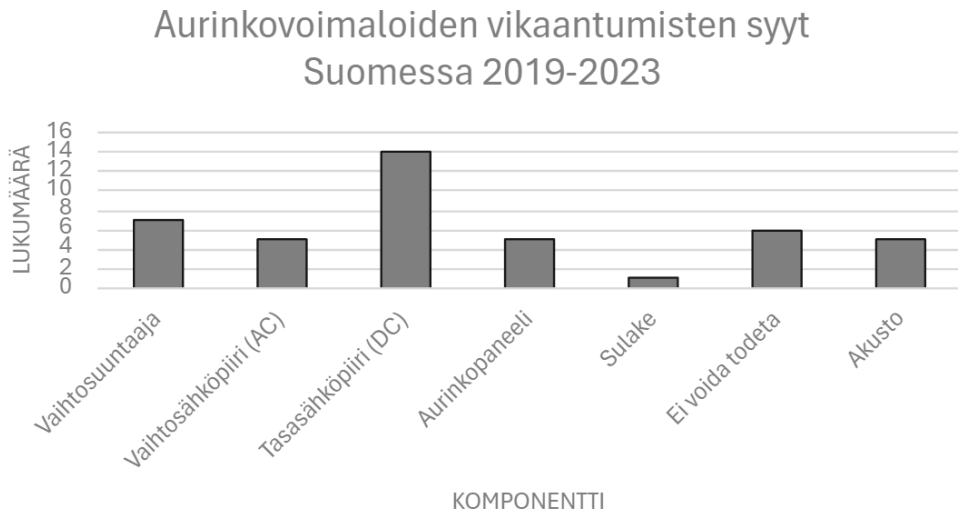
Vikaantumisten lukumäärät vuosittain (2019-2023)



Kuva 13. Vikaantumisten lukumäärät vuosittain [52].

Vuonna 2023 vikaantumisten lukumäärä on räjähdysmäisesti lähtenyt kasvuun. Pelkästään kyseessä olevan vuoden aikana tapahtuneen vikaantumiset vastaavat neljän edeltävän vuoden yhteenlaskettua tapaturmamäärää. Tämä on selitettävissä osittain aurinkoenergian yleistymisellä. Aineistosta tosin saattaa puuttua paljon kirjaamattomia tapahtumia, jotka jäävät pois aineistosta. Lisäksi aineisto edustaa ainoastaan yhdestä tietokannasta saatua dataa eikä kerro esimerkiksi yritysten keräämää tietoa.

Aineistosta sai myös palosyöntutkijoiden antamia kuvauksia sekä arvioita palon syttymisestä ja etenemisestä. Näiden samojen tietojen perusteella saatiin luotua seuraava tarkentava diagrammi aurinkosähkövoimaloiden vikaantumisten syttymissyistä (kuva 14).



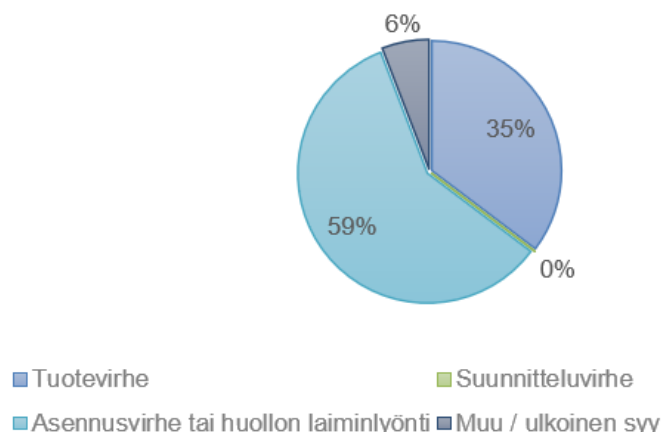
Kuva 14. Aurinkovoimaloiden vikaantumisten syyt Suomessa [52].

Kuvaajasta on havaittavissa selkeänä poikkeuksena tasasähköpiirin suuri vikaantumismäärä suhteessa muihin järjestelmän komponentteihin. Tämä johtuu todennäköisesti tasasähköliitoksista ja epäturvallisen suurista sähkövirroista. Kuvaajan ”ei voida todeta” -pylväs tarkoittaa sitä, että syttymisen syyksi todetaan tai arvioidaan aurinkosähköjärjestelmä, mutta ei kuitenkaan tutkittu tarpeeksi todetukseen jonkun tietyn järjestelmän osan olevan syynä. Näissä tapauksissa siis tiedetään syttymisen olevan aurinkosähköjärjestelmästä peräisin, mutta tuhojen vuoksi ei voida paikantaa tarkkaa syttymissyitä.

Vaihtosuuntaajaa ei voida lukea pelkästään vaihtosähköpiiriin, koska se sisältää myös tasasähkökomponentteja. Ilman tarkempaa tutkintaa ei siis voida todeta varmaksi, kumpi sähkötyyppi on ollut osana vaihtosuuntaajan vikaantumisessa. Tämän vuoksi vaihtosuuntaajalla on oma kategoriansa. Se myös edustaa merkittävää osaa voimalan kustannuksissa ja sähköturvallisuudessa, minkä vuoksi sen oma kategorisointi on järkevää.

Lopuksi Pronton aineistosta voidaan jaotella tapaturmat kantasyihin, eli asennus-, suunnittelu- tai tuotevirheeksi. Muut syyt tarkoittavat ulkoisia tekijöitä, eli ihmisen tai ympäristön aiheuttamaa syytä, kuten ilkivaltaa tai eläinten vaikutusta. Kantasyyt ovat jaoteltuna alla prosentiosuuksittain kuvassa 15.

## Aurinkovoimaloiden vikaantumisten kantasyyt Suomessa (2019-2023)



Kuva 15. Aurinkovoimaloiden vikaantumisten kantasyyt Suomessa prosenttiosuuksittain vuosina 2019–2023 [52].

Asennusvirhe on suurin vaaratekijä tämän aineiston mukaan ja sen laadun vaikutus järjestelmän turvallisuuteen on siis erittäin merkittävä. Kriittisesti ajateltuna on kuitenkin huomioitava kantasyyn tutkimuksen vaikeudet. Esimerkiksi ulkoiset syyt sekä suunnitteluun liittyvät virheet voivat olla vaikeammin todettavia, kuin asennusvirheet. Toisaalta asennusvirhe on helppo huomata, mikä helpottaa sen erottamista muista virhetyypeistä. Asennuksen tyypillisiä virheitä on tarkasteltu luvussa 3.3.

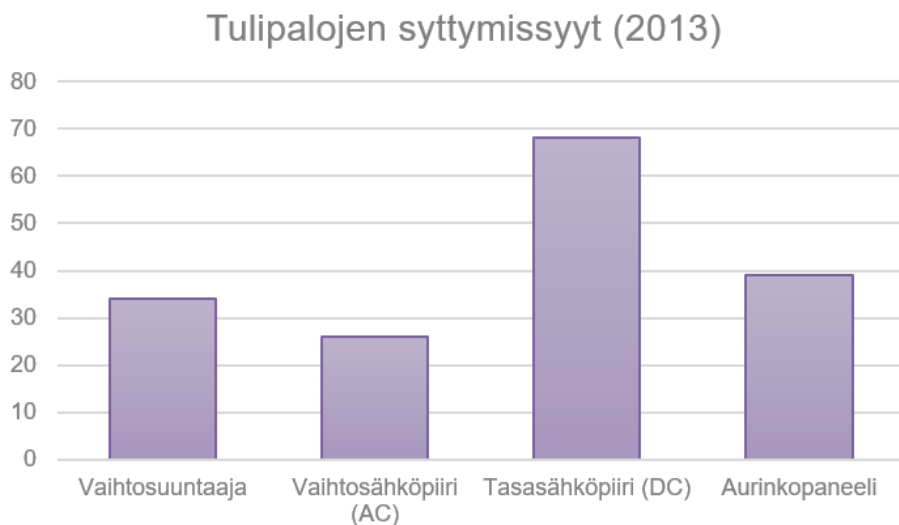
Suurimmassa osassa tapauksista tässä datanäytteessä oli kyseessä varsin pieni aurinkosähköjärjestelmä. Tapaturmien kuvauksien perusteella voidaan arvelia, että suurin osa tapaturmista aiheutui omakotitaloille ja mökeille asennetuista järjestelmistä. Suurempien järjestelmien tulipalot ja tuhojen kustannukset ovat epäilemättä vakuutusyhtiöiden omissa tiedoissa, jotka eivät ole julkista tietoa. Eräältä vakuutusyhtiöltä kuitenkin saatiin hieman tietoa aurinkojärjestelmien aiheuttamista tuhoista. Yhtiön mukaan vuosina 2015–2023 on sattunut noin 300 tapaturmaa, joista yhtiö korvasi 280 000 €. Jokaista tapaturmaa kohden on siis keskimäärin korvattu noin 933 €. Tästä aineistosta ei pysty tekemään tarkempaa analyysiä, mutta siitä voi pohtia tulipalon aiheuttamia tuhoja keskimäärin. Korvattavasta hinnasta päätellen tuhojen suuruus ei siis keskimäärin ole järin

suuri, eli palot eivät ehdi syttyä tai levitä kiinteistöön laajasti. Laiterikot voivat maksaa tässä mittakaavassa vain pieniä määriä, mikä voi selittää korvauksien suhteellisen pienen määrän.

#### 4.2.2 Aurinkosähkövoimaloiden vikaantuminen maailmalla

Muualta maailmalta saatava julkinen data oli helpompaa saada laajemman tutkimisen vuoksi. MLPE-tekniikka on kuitenkin käytännössä niin uutta, ettei tutkimuksissa ilmene tarkemmin minkään palon aiheutuneen mikrovaihtosuuntaajista tai virranoptimoijista. Aineistoa voidaan silti analysoida tasasähköpiirin puolelta yleisesti, vaikka vikoja ei ole täsmennetty sen tarkemmin.

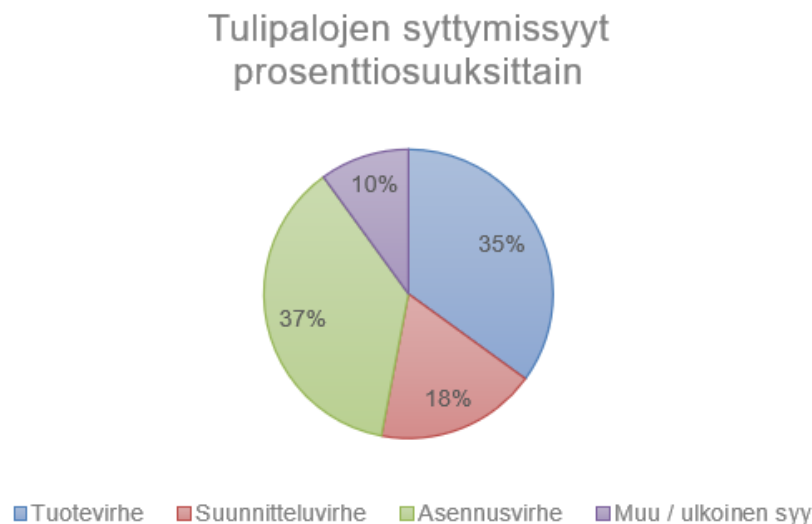
Tärkeimpänä lähteenä ilmeni saksalainen tutkimus vuodelta 2013, jossa tutkittiin aurinkosähkövoimaloiden aiheuttamia tulipaloja. Tässä tutkimuksessa oli saatu selville joitain syttymissyitä sekä jaoteltu niitä komponenttien mukaan (kuva 16).



Kuva 16. Aurinkosähkövoimaloiden aiheuttamat tulipalot syttymissyiden mukaan [43, s. 48].

Yleisesti ottaen voidaan todeta tässäkin aineistossa tasasähköpiirin aiheuttavan eniten ongelmia tulipalojen syttymisen suhteen. Tasasähköpiiriin kuuluu tutkimuksen mukaan ketjut, jotka ovat ennen vaihtosuuntaajaa. Ketjujen helposti syttyviä osia ovat liittimet, kaapelit ja liitinrasiat. [37, s. 2.]

Komponenttien ulkopuolella olevat syttymisen syyt on jaettu karkeasti neljään osaan Suomesta saadun aineiston tavoin: tuotevirheet (komponenttien syttymiset), suunnitteluvirheet, asennusvirheet ja ulkoiset tekijät. Sattuneita tapauksia oli 110, joissa jokin edellä mainituista syistä voitiin todentaa tulipalon aloittavaksi virheeksi. Kuvasta 17 nähdään kaavio, joka havainnollistaa syttymissyitä prosenttiosuuksittain.



Kuva 17. Tulipalojen syttymissyöt prosenttiosuuksittain [37, s. 2].

Tästä datasta erottuu suurimmiksi vioiksi asennus- ja tuotevirheet. Asennusvirheitä voi olla esimerkiksi huolimattomuus liitinten ja kaapeleiden kanssa. Asennusvirheitä ja niiden aiheuttamia ongelmia on listattu useita. Hyvä puoli asennusvirheissä on se, että kouluttamalla asentajia ja huomioimalla laatuvaatimukset on helppoa päästä eroon virheiden aiheuttamista tulipaloista. Muutamia tyyppisiä asennus- ja suunnitteluvirheitä on lueteltuna alla:

- tasasähkökytkimen alimitoittaminen, mikä aiheuttaa ylikuumenemisen myötä valokaaren
- tasasähköjohdotus vaurioitunut terävän metallikulman- tai reunan vuoksi, joka on rikkonut johtoa riittävästi aiheuttaakseen valokaaren
- sopimattomien liittimien käyttö alumiinijohdinten yhdistämiseen, josta on aiheutunut lisääntyneen kosketinresistanssin myötä tulipalo
- tasasähköliitin kiinnitetty löysästi tai olemattomasti, josta aiheutunut valokaari
- kaapelien jännitysten purkamisen puute, josta aiheutunut liitosten löystyminen ja tulipalo.

Ulkoisiin syihin voidaan lukea sattumanvarisia tapahtumia, kuten tutkimuksesta otettuina esimerkkeinä salamaniskut, jyräjoiden tekemät kaapelivahingot tai korjaajan poraama ruuvi kaapeleihin. [43, s. 25–26.]

### 4.3 Johtopäätökset

Prontosta saatu aineisto oli osin puutteellista, mutta tieto on kuitenkin tutkimusmielessä arvokasta. Tietokannan rajoitteet on syytä ottaa huomioon tutkimusta tehdessä ja lukiessa. Kaikissa pelastuslaitoksen tiedoissa ei ollut täydennetty syytä palon syttymiselle tai pystytty varmentamaan syttymisen alkuperää.

Näissä tapauksissa tietoa ei ole kirjattu tähän analyysiin, vaan ainoastaan sellaiset tiedot, jotka asiantuntija on pystynyt todentamaan tai vahvasti epäilemään. Koska tapaturmien kirjaajia Prontoon on ollut useita, niiden tarkkuus yksityiskohdissa vaihtelee. Osittain aineisto on siis analysoijan tulkinnan varassa, sillä kaikki tapaturmien kuvaukset eivät antaneet tarpeeksi tarkkaa kuvaa tapahtumien kuluista. Aineistoon oli usein merkattu tutkijan kommentti syttymissyystä, mutta kantasyö oli jäänyt kommentoimatta. Tällöin ei analyysiin voitu täyttää

kantasyytä, eli asennus-, suunnittelu- tai tuotevirhettä. Tämän vuoksi analyysissä esiintyy eroavaisuuksia tapauksen lukumäärissä, kun verrataan tapaturmien määriä kantasyihin.

Vaikka Suomesta saatu aineisto oli huomattavasti pienempi kuin muualta maailmasta saatu, siinä ilmeni silti samoja piirteitä. Tasasähköpiiri on tilastollisesti todennäköisin syytymissyy, minkä vuoksi on tärkeää minimoida riskit syyttymiselle etenkin tasasähköpuolella. Koska MLPE-tekniikasta ei ole mainintaa missään tämän työn aineistoissa, voidaan ainakin poissulkea suuri merkitys tekniikan mahdollisista negatiivisista vaikutuksista. Huomioitavaa tosin on myös lähteiden ajankohta, sillä laitteiden yleistyminen on tapahtunut vasta viime vuosikymmenen aikana. Voidaan kuitenkin olettaa, että ongelmia olisi tullut aiemmin ilmi, sillä laitteita on ollut olemassa jo ennen vuotta 2013. Käsiteltäessä useiden satojen aurinkovoimaloiden tapaturmia maailmanlaajuisesti voisi odottaa jonkin MLPE-laitteen olleen mainittuna syytymissyynä. Tätä voi osittain selittää kyseisten laitteiden nuori kehitys- ja käyttöikä.

Lähtökohtaisesti tekniikan kehittämisessä on hyvä olla kriittinen tuotteiden laadun parantamiseksi. Tutkimusten vähäisyys ja todistusaineiston puutteeseen nojaten ei voida todeta MLPE-laitteiden olleen syyttymisen syynä mihinkään aineistoissa tapahtuneissa tulipaloissa. Toistaiseksi voi olla liian aikaista todeta näiden laitteiden aiheuttavan merkittävää riskiä järjestelmien turvallisuuteen, koska ne ovat vielä tuore innovaatio eivätkä ne juurikaan näy tilastoissa. Jos ajatellaan hyvin valmistettuja MLPE-laitteita, ne osoittavat lupaavaa turvallisuuden kehityksen askelta aurinkovoimaloihin turvaamalla tasasähköpiiriä jännitteen laskemisella ja valokaarien tunnistuksella.

Ikääntymisen vaikutusta näihin on vielä vaikea arvioida, mutta valmistajien pitkän takuun perusteella sen ei pitäisi olla ongelma, kun tarkastellaan yleisesti aurinkosähkövoimaloiden käyttöikä. Saksassa tehdyn tutkimuksen mukaan suurin osa tapaturmista kuitenkin syntyi ensimmäisenä vuonna voimalan rakentamisesta [53, s. 60]. Koska edellä mainittu aineisto on tuotettu vuonna 2013,

MLPE-laitteiden osuus on aineistossa todennäköisesti erittäin pieni. Käyttövalmiit MLPE-laitteet alkoivat yleistyä vasta noin 2010-luvulla.

Kritiikki virranoptimoijiin perustuu liitosten määrän kasvattamiseen, mutta verkosta löydetyn aineiston perusteella esimerkiksi jotkut suuret valmistajat eivät perusta väitöksiään virranoptimoijia vastaan muulla tapaa, kuin tasasähköliitosten lisäämisen riskinä. Vaikka väitys liitosten moninkertaistamisessa itsessään on hyvä argumentti, se ei välttämättä ota huomioon virranoptimoijien virran ja jännitteen säätöä tai valokaarien tunnistusta. Validia kritiikkiä on myös annettu niiden lisäämästä hinnasta järjestelmään, jota kaikki eivät ole valmiita maksamaan sekä standardien puutteesta. Laitteiden käyttö myös usein sitoo käyttäjän yhteen tai pieneen määrään valmistajia, mikä ei ole kilpailuttamisen kannalta paras vaihtoehto. [48, s. 32, 69–71; 54.]

MLPE-laitteita suosittavia tahoja oli helpompi löytää. Pohjola Vakuutuksen aiemmin työssä mainitussa suojeluohje S950:ssä suositellaan MLPE-laitteistoa kehottamalla käyttäjää asentamaan virranoptimoijia aurinkojärjestelmään. Ohjeessa täsmennetään tätä väitettä lisäämällä sen, että MLPE-tekniikka seuraa häiriöitä automaattisesti. Työssä selvitettiin suositukselle perusteita ja saatiin vastaus Pohjola Vakuutuksen asiantuntijalta. Perusteena suositukselle on useiden eri toimijoiden ja asiantuntijoiden riskiarviot, joiden perusteella suojeluohje on alun perin laadittu. MLPE-tekniikkaa käsittelevä kohta on asennussuositus, eikä vaatimus, koska asiakirjaa tehdessä jäi epäselväksi, kuinka paljon tätä tekniikkaa käytetään Suomessa. [55.]

Toinen MLPE-laitteita suosittava taho löytyi Motivan ja Soleraksen yhteistyönä toteutetusta aurinkosähkön turvallisuusraportista (48). Raportista käy ilmi, että muuan australialaisessa tutkimuksessa päädyttiin suosittamaan MLPE-laitteita. Australiassa on vuosien 2009 ja 2015 välillä sattunut aurinkosähköön liittyen suuri määrä tulipaloja, joiden epäillään liittyvän pakolliseen tasasähköturvakytkimeen. [48, s. 67.] Lisäksi MLPE-laitteita tukee vahvasti esimerkiksi kyseisistä laitteista tunnettu SolarEdge, jonka turvallisuutta edistävien laitteiden ominaisuuksia käytiin läpi luvuissa 2.1.3 ja 3.3.

Verkkoaineistona aiheesta löytyi satunnaisia artikkeleita, joissa oli статистиikkaa mukana tukemassa MLPE-laitteen kannattavuutta. Muun muassa verkkosivu PV Magazine näkee laitteet turvallisina ja luotettavina. MLPE-laitteita suosittelia sivustoja tuli työn edetessä useita vastaan. Kyseisen lähteen mukaan jopa kolmasosa Yhdysvaltojen omakotijärjestelmistä asennettiin virranoptimoijia tai mikrovaihtosuuntaajia hyödyntäen. [56.]

Voidaan todeta, että tavallisiin ketjuvaihtosuuntaajiin nähden MLPE-laitteet tuovat potentiaalisesti parempaa sähkö- ja paloturvallisuutta aurinkosähköjärjestelmiin. Tavallisissa ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmissä ei ole ilmennyt suuria muutoksia turvallisuuteen, kun taas MLPE-tekniikka tarjoaa paljon enemmän kehitystä turvallisuuteen ja tuotantoon. Loppujen lopuksi turvallisuus koostuu kuitenkin monesta eri tekijästä, kuten huolellisesta asennuksesta ja suunnittelusta, eikä pelkästään laiteturvallisuudesta.

## 5 Yhteenveto

MLPE-tekniikka on vielä uutta ja kehitteillä olevaa, minkä vuoksi sen turvallisuudesta ei voida vetää vielä suoria johtopäätöksiä. Aineistosta ei ilmennyt viitteitä MLPE-laitteiden vika- tai vaaratilanteista. Osasyynä tähän oli aineiston vähäinen tutkimus sekä aineiston pieni määrä. MLPE-laitteet lisäävät mahdollisesti voimaloiden turvallisuutta niiden monien turvallisuusominaisuuksien vuoksi. Aurinkosähköjärjestelmien turvallisuuteen liittyy muitakin tekijöitä kuin komponenttien laatu. Esimerkiksi asennuksen ja suunnittelun laatu on ensiarvoisen tärkeä tekijä aurinkosähkövoimalan turvallisuudessa ja tuotannossa.

Tavallisten ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmien heikkoutena on tuotannon teho heikoiten tuottavan paneelin mukaan. Uusissa ketjuvaihtosuuntaajajärjestelmissä on myös valokaaritunnistimia, mutta ne eivät valvo tai ohjaa aurinkovoimalaa samalla tavalla, kuin MLPE-tekniikkaa hyödyntävät aurinkovoimalat. MLPE-tekniikka on saanut kritiikkiä suuresta määrästä tasavirtaliitoksia, joista suuri osa paloista saa alkunsa. Osa aurinkotekniikan laitteiden valmistajista ja

asiantuntijoista kuitenkin suosittelee tai puoltaa näitä laitteita. Laadukkaasti valmistetut MLPE-laitteet voivat olla erinomainen ratkaisu tulevaisuuden turvallisiin ja luotettaviin aurinkosähköjärjestelmiin.

## Lähteet

- 1 Aurinkokennoista ja piistä perustietoa. Verkkoaineisto. Yhdysvaltojen energiaosasto. <<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics> piistä tietoa>. Luettu 21.2.2024.
- 2 Edis, Osmanbasic. 2019. PN-liitoksesta ja perovskiiitista aurinkokennossa. Verkkoaineisto. Engineering. <<https://www.engineering.com/story/challenges-of-making-solar-energy-economical>>. 30.12.2019. Luettu 21.2.2024.
- 3 Aurinkokennon toimintaperiaate. Verkkoaineisto. Kyocera. <[https://global.kyocera.com/prdct/solar/spirit/about\\_solar/cell.html](https://global.kyocera.com/prdct/solar/spirit/about_solar/cell.html)>. Luettu 21.2.2024.
- 4 PN-liitoksen kuvitus ja tukevaa tietoa. 2020. Verkkoaineisto. Electrical4u. <<https://www.electrical4u.com/solar-cell/>> Luettu 21.2.2024.
- 5 PN-liitoksen teoriaa. 2022. Verkkoaineisto. Arka360. <<https://arka360.com/ros/semiconductor-junctions/>> Luettu 22.2.2024.
- 6 Tukevaa teoriaa PN-liitoksesta. Verkkoaineisto. <[https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode\\_2.html](https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_2.html)> Luettu 22.2.2024.
- 7 Aurinkopaneelien kytkennästä sarjaan ja rinnan. 2023. Verkkoaineisto. Renogy. <<https://www.renogy.com/learn-series-and-parallel/>> Luettu 22.2.2024.
- 8 Sarjaan- ja rinnankytkentää tukevaa materiaalia. 2023. Verkkoaineisto. Jackery. <<https://www.jackery.com/blogs/knowledge/solar-panel-series-vs-parallel>> Luettu 24.2.2024.
- 9 Yksi- ja monikiteisestä kennorakenteesta. 2023. Verkkoaineisto. Energysage. <<https://www.energysage.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/>> Luettu 24.2.2024.
- 10 Vaihtosuuntaajasta yleisesti. Verkkoaineisto. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. <<https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat#ddd335c1>> Luettu 25.2.2024.
- 11 Vaihtosuuntaajan tyypillisiä ominaisuuksia. Verkkoaineisto. Aurinkovirta. <<https://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkovoimala/invertteri/>>. Päivitetty 21.2.2024. Luettu 27.2.2024.
- 12 Demoulias, Charis. 2013. Vaihtosuuntaajien hyötysuhteiden vertailu. Verkkoaineisto. Researchgate. <[https://www.researchgate.net/figure/Efficiency-curve-of-various-solar-inverters\\_fig8\\_258220930](https://www.researchgate.net/figure/Efficiency-curve-of-various-solar-inverters_fig8_258220930)>. 10.2013 Luettu 27.2.2024.

- 13 Vaihtosuuntaajien vaarallisuudesta. Verkkoaineisto. Worksafe. <<https://www.worksafe.qld.gov.au/safety-and-prevention/hazards/electricity/hazardous-electrical-environments/identifying-high-voltage-hazards%>>>. Päivitetty 1.3.2023. Luettu 28.2.2024.
- 14 Woodford, Chris. 2009. Vaihtosuuntaajien luokittelusta aaltofunktion mukaan. Verkkoaineisto. Explainthatstuff. <<https://www.explainthatstuff.com/how-inverters-work.html#definition>>. Päivitetty 19.11.2019. Luettu 28.2.2024.
- 15 Fedkin, Mark. Vaihtosuuntaajille tyypillinen aaltofunktio ja sen perustelut. John A. Dutton E-education institute. Verkkoaineisto. E-education. <<https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/711>>. Luettu 28.2.2024.
- 16 Miten vaihtosuuntaajia valitaan aurinkovoimaloihin. Verkkoaineisto. Powmr. <<https://powmr.com/blogs/news/how-to-choose-inverter-for-solar-system-off-grid>>. 30.10.2023. Luettu 3.3.2024.
- 17 SolarEdgen vaihtosuuntaajien aaltofunktiosta. Verkkoaineisto. SolarEdge. <<https://www.solaredge.com/uk/products/pv-inverter/single-phase>>]. Luettu 3.3.2024.
- 18 Mikroinverttereistä yleisesti. Verkkoaineisto. Solle. <<https://solle.fi/aurinkopaneelien-invertteri/>>. 17.2.2024. Luettu 4.3.2024.
- 19 Tukevaa materiaalia mikroinverttereiden toiminnalle. Verkkoaineisto. Enphase. <<https://support.enphase.com/s/article/What-is-a-Microinverter>>. Luettu 4.3.2024.
- 20 Virranoptimoijan perustietoja optimoijan datalehdestä. Verkkoaineisto. SolarEdge. <<https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-p-series-commercial-add-on-power-optimizer-datasheet.pdf>>. Luettu 4.3.2024.
- 21 Hahn, Dan. 2024. Virranoptimoijan edut ja toiminnot. Verkkoaineisto. Solar Reviews. <<https://www.solarreviews.com/blog/complete-guide-to-power-optimizers#optimizers>>. Päivitetty 15.4.2024. Luettu 4.3.2024.
- 22 Kuva, SolarEdgen virranoptimoija. Verkkoaineisto. ESTG. <<https://www.estg.eu/fi-fi/solaredge-power-optimizer-p850-4r-mxm-by/>>. Luettu 4.3.2024.
- 23 Ben-David, Anna. 2023. Virranoptimoijien turvaominaisuuksia ja etuja. Verkkoaineisto. SolarEdge. <<https://www.solaredge.com/en/solaredge-blog/power-optimizers>>. 4.5.2023. Luettu 7.3.2024.
- 24 Mäkinen, Jukka. 2019. Aurinkosähkö osana energiamurrosta PV-voimalan suunnittelijan opas, 3. painos. Verkkoaineisto. ABB. <<https://library.e.abb.com/public/ce25fe8cf14c4fb3948ea422de5958ac/Aurinkosahko%20osana%20energiamurrosta%20PV-voimalan%20Suunnitteli->

- jan%20Opas%20III%20painos.pdf?x-sign=urko4uhZzNfpN882MV7XdaX-fQN2UsITIU8XLdGtGwH1TCbo7AfecVY6QGv/aFq20>. 2019. Luettu 7.3.2024.
- 25 IEC 62548:2016:fi. Aurinkosähköpaneelistojen suunnitteluvaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto.
  - 26 Sähkömittarit osana aurinkojärjestelmää. Verkkoaineisto. SolarEdge. <<https://www.solaredge.com/en/products/metering-and-sensors/current-transformers>>. Luettu 7.3.2024.
  - 27 Flyktman, Teppo & Hytönen, Vesa. 2020. Aurinkosähkötyöpaja. Verkkoaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <<https://keskisuomi.fi/wp-content/uploads/sites/3/2021/01/Aurinkosahkotyopaja.pdf>>. 3.6.2020. Luettu 10.3.2024.
  - 28 McFadden, Connor. 2021. MPPT-säädinten liittämistä tasavirtapuolelle ja tukevaa yleistä materiaalia. Verkkoaineisto. Greentech Renewables. <<https://www.greentechrenewables.com/article/understanding-mppt-and-mlpe>>. 03.2021. Luettu 10.3.2024.
  - 29 Willuhn, Marian. 2021. MPPT-säädinten integroinnista muihin laitteisiin. Verkkoaineisto. PV-Magazine Intia. <<https://www.pv-magazine-india.com/2021/04/24/the-long-read-understanding-solar-mlpe/>>. 24.4.2021 Luettu 10.3.2024.
  - 30 Sharma, Nidhi. 2023. MPPT-säädinten heikkouksista. Verkkoaineisto. Ornate Solar. <<https://ornatesolar.com/blog/decoding-power-optimizers-and-their-benefits-for-your-pv-system>>. 22.6.2023. Luettu 10.3.2024.
  - 31 MPPT-säädin, Victron Energy BlueSolar MPPT 100. Verkkoaineisto. Flickr. <<https://www.flickr.com/photos/stephanridgway/25128700050/in/photostream/>>. Luettu 11.3.2024.
  - 32 String-invertterin toiminta lyhyesti. 28.2.2023. Verkkoaineisto. Ralos. <<https://ralos.fi/invertterit-osa-3-string-invertterit/>>. Luettu 11.3.2024.
  - 33 MLPE-tekniikasta yleisesti. Verkkoaineisto. Solar Hybrids. <[https://www.solarhybrids.com.au/system\\_offering/module-level-power-electronics-systems-mlpe/](https://www.solarhybrids.com.au/system_offering/module-level-power-electronics-systems-mlpe/)>. Luettu 11.3.2024.
  - 34 MLPE-tekniikan tuotannon parantamisesta. Verkkoaineisto. Aurora Solar. <<https://aurorasolar.com/blog/module-level-power-electronics-mlpe-for-solar-design-a-primer/>>. Luettu 11.3.2024.
  - 35 Mikä on maadoitus ja mihin se on tarkoitettu. Maadoitusta tukevaa materiaalia. Verkkoaineisto. MyElectricianExp. <<https://my.electricianexp.com/fi/hto-takoe-zazemlenie-i-dlya-chego-ono-prednaznacheno.html>>. Päivitetty 25.9.2019. Luettu 15.3.2024.

- 36 Pelastuslaitoksen paloturvallisuusohje aurinkosähköjärjestelmille. 18.1.2023. Verkkoaineisto. Pelastuslaitos. <[https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2023-01/Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelmien\\_paloturvallisuusohje\\_S\\_18012023.pdf](https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2023-01/Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelmien_paloturvallisuusohje_S_18012023.pdf)>. Luettu 15.3.2024.
- 37 Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization. Saksalainen aurinkosähköjärjestelmien tulipaloriskien tutkimus. 2018. Verkkoaineisto. Fraunhofer. <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline\\_Translation\\_V04%2020180614\\_FINAL.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline_Translation_V04%2020180614_FINAL.pdf)>. Luettu 15.3.2024.
- 38 Aurinkovoimaloiden turvallisuusohjeistus. Verkkoaineisto. Helen. <[https://www.helen.fi/globalassets/aurinko/yritykset/20210113\\_aurinkovoimaloiden-turvallisuusohje2.pdf](https://www.helen.fi/globalassets/aurinko/yritykset/20210113_aurinkovoimaloiden-turvallisuusohje2.pdf)>. Luettu 15.3.2024.
- 39 Aurinkovoimaloiden paloturvallisuudesta. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_paloturvallisuus](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_paloturvallisuus)>. Päivitetty 2.2.2023. Luettu 15.3.2024.
- 40 Korroosioluokituksista. Verkkoaineisto. Tobsteel. <<https://www.tobsteel.com/en/materials/corrosion-resistance-classes-crc/>>. Luettu 16.3.2024.
- 41 Korroosioluokitusten lisämateriaali. 07.2023. Verkkoaineisto. Powdertech Corby. <<https://www.powdertechcorby.co.uk/contentfiles/files//C1%20to%20C5%20%20corrosion%20chart%202023.pdf>>. Luettu 16.3.2024.
- 42 Uutta tutkittua tietoa aurinkosähköjärjestelmän toiminnasta palotilanteessa. Savon ammattikorkeakoulun tutkimuksen artikkeli. 14.6.2021. Verkkoaineisto. SAMK. <<https://www.samk.fi/tki/uutta-tutkittua-tietoa-aurinkosahkojarjestelman-toiminnasta-palotilanteessa>>. Luettu 16.3.2024.
- 43 IEC/TR 63226:2021. Rakennuksiin asennettujen aurinkosähköjärjestelmien paloriskien hallinta. Suomen Standardisoimisliitto.
- 44 Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat. Ylläpitoa tukevaa materiaalia. 05.2020. Verkkoaineisto. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö. <[https://issuu.com/spek\\_ry/docs/muuttuva\\_rakennettu\\_ymparisto\\_toukokuu\\_2020?fr=sYWVhYTE0NDkxOTU](https://issuu.com/spek_ry/docs/muuttuva_rakennettu_ymparisto_toukokuu_2020?fr=sYWVhYTE0NDkxOTU)>. Luettu 18.3.2024.
- 45 SFS-EN 62446-1:2016. Aurinkosähköjärjestelmät. Vaatimukset dokumentaatiolle, kunnossapidolle ja testaamiselle. Osa 1: sähköverkkoon kytketyt järjestelmät. Dokumentaatio, käyttöönottestit ja tarkastus. Suomen Standardisoimisliitto.
- 46 OP Pohjola Vakuutus suojeleohje aurinkovoimaloita varten, S950. 1.1.2023. Verkkoaineisto. Pohjola Vakuutus.

- <<https://www.op.fi/tac?did=Yr-kii0000006056&cs=fb801ca508f5eea37780b743a7e73073bf3a18e5eb021c8364f8a11b9256c92d>>. Luettu 18.3.2024.
- 47 Eri standardijärjestöt ja opas sertifikaateille. 4.11.2023. Verkkoaineisto. Maysun Solar. <<https://www.maysunsolar.eu/blog/introduction-to-solar-panel-certifications-2023-guide>>. Luettu 22.3.2024.
- 48 Rasinkoski, Asko. 2020. Aurinkosähköjärjestelmien paloriskit ja sammutusturvallisuus. Verkkoaineisto. Motiva/Soleras. <[https://www.motiva.fi/files/17365/Aurinkosahkojarjestelmien\\_paloriskit\\_ja\\_sammutusturvallisuus.pdf](https://www.motiva.fi/files/17365/Aurinkosahkojarjestelmien_paloriskit_ja_sammutusturvallisuus.pdf)>. 5.1.2020. Luettu 24.3.2024.
- 49 NEC:stä tietoa lyhyesti. Verkkoaineisto. Electrical Safety Foundation. <<https://www.esfi.org/workplace-safety/industry-codes-regulations/the-national-electrical-code-nec/>>. Luettu 24.3.2024.
- 50 Investigation of the Effects of Photovoltaic (PV) System Component Aging on Fire Properties for Residential Rooftop Applications. Malesiassa tehdyn tutkimuksen artikkeli paloturvallisuudesta. 2021. Verkkoaineisto. SFPE. <<https://www.sfpe.org/publications/periodicals/sfpeeuropedigital/sfpeeuropa21/europeissue21feature5>>. Luettu 5.4.2024.
- 51 Pronto, Pelastuslaitoksen tietokanta. 23.10.2023. Laitoksen sisäinen aineisto. Pelastuslaitos.
- 52 Pronto, Pelastuslaitoksen tietokanta. 3.4.2024. Laitoksen sisäinen aineisto. Pelastuslaitos.
- 53 Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization. Aurinkosähköjärjestelmien saksalainen palotutkimus. 2013. Verkkoaineisto. Fraunhofer. <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline\\_Translation\\_V04%2020180614\\_FINAL.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline_Translation_V04%2020180614_FINAL.pdf)>. Luettu 6.4.2024.
- 54 Kritiikkiä MLPE-laitteista. Verkkoaineisto. Fronius. <<https://www.fronius.com/en/solar-energy/installers-partners/products-solutions/features/dynamic-peak-manager>>. Luettu 6.4.2024.
- 55 Siljoranta, Jari. 2024. Pohjola Vakuutus. Sähköposti. Luettu 25.3.2024.
- 56 Hutchins, Mark. 2022. MLPE-suositukset antanut sivusto. Verkkoaineisto. PV-Magazine. <<https://www.pv-magazine.com/2022/08/12/huge-opportunity-for-module-level-power-electronics/>>. 12.8.2022. Luettu 8.4.2024.

## Liitteet

### Excel-taulukko Suomesta saadusta aineistosta

Suomesta kerätty data			
Lähde:		Pronto, Päijät-Hämeen Pelastuslaitos (2023)	
Vuosi	Rakennuspallo	Vikaantum	Rakennuspalovaara
2016	0	Vaihtosuu	0
2017	3	Vaihtosähk	0
2018	2	Tasasähkö	4
2019	1	Aurinkopa	1
2020	3	Muuntaja	3
2021	5	Liitäntäele	3
2022	6		0
2023	11		6
Suomesasta kerätty data			
Lähde:		Pronto	
Vuosi	Vikaantumisten lkm.	Vikaantum	Vikaantumisen syyn lkm.
2019	2	Vaihtosuu	7
2020	5	Vaihtosähk	5
2021	6	Tasasähkö	14
2022	6	Aurinkopa	5
2023	19	Sulake	1
		Ei voida to	6
		Akusto	5
		Yht.	43
Lähde:		Pronto	
Vikaantumisten syy jaoteltu pääaiheittain			
Syy	Prosentti	lukumäärä	
Tuotevirhe	35 %	6	
Suunnitteluvirhe	0 %	0	
Asennusvirhe tai hu	59 %	10	
Muu / ulkoinen syy	6 %	1	
yht	100 %	17	

## Excel-taulukko saksalaisesta tutkimuksesta saadusta aineistosta

Vuosi	Vikaantumisten lkm.	Vikaantumisen syy	Vikaantumisen syyn lkm.
2016		Vaihtosuuntaaja	34
2017		Vaihtosähköpiiri (AC)	26
2018		Tasasähköpiiri (DC)	68
2019		Aurinkopaneeli	39
2020		Muuntaja	
2021		Liitäntäelektronikka	
2022			
2023			
		Yht.	167

Muualta kerätty data Huomioita: Tutkimus on vanha! 2013  
Lähde: IEC/TR 63226:2021:fi

Syy	Prosentti (110 vikaa)	lukumäärä
Tuotevirhe	35 %	39
Suunnittelu	18 %	20
Asennusvirhe	37 %	41
Muu / ulkopuoliset syyt	10 %	11
yht.	100 %	110

Lähde: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/DE/Products/Power%20Electronics/Power%20Electronics%20in%20PV%20Systems/Power%20Electronics%20in%20PV%20Systems%20-%20IEC%20TR%2063226%20-%202021%20-%20fi.pdf>  
Vikaantumisten syy jaoteltu pääaiheittain