



Aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapito- periaatteet

Lauri Laivoranta

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

LAIVORANTA, LAURI:

Aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapitoperiaatteet

Opinnäytetyö 85 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Huhtikuu 2021

Aurinkosähkön tuotannon nopean kasvun sekä yhä suurempien kasvuodotusten myötä sähköalalle on muodostunut uusia osaamistarpeita. Tässä opinnäytetyössä onkin perehdytty aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapitoperiaatteisiin. Opinnäytetyössä selvitettiin aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapitovaiheessa huomioitavia teknisiä asioita käytännön näkökulmasta.

Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa lukijalle ymmärrys aurinkosähköjärjestelmän toteutus- ja kunnossapitovaiheen sisällöstä. Lisäksi tavoitteena oli kerätä yhteen tarvittavat tiedot, joiden pohjalta laaditaan opinnäytetyön toimeksiantajayrityksen henkilöstölle tarvittava perehdytys- ja dokumentointiaineisto aurinkosähköjärjestelmien parissa työskentelemiseksi. Työn tutkimuskysymykset olivat seuraavat: Miten aurinkosähköjärjestelmä toteutetaan ja pidetään kunnossa sekä mitä asioita eri työvaiheissa tulee ottaa huomioon? Opinnäytetyön tutkimus toteutettiin kuvailevana kirjallisuuskatsauksena. Tutkimus rajattiin koskemaan alle 100 kVA:n mikrotuotantolaitoksia. Tutkimusaineistona käytettiin pääasiassa alaa koskevia standardeja ja oppaita sekä tukimateriaaleina tutkimuksia ja selvityksiä.

Opinnäytetyössä selvitettiin laajasti aurinkosähköjärjestelmien toteuttamisessa huomioitavia asioita, kuten komponenttien mitoittamista, valintaa ja asentamista sekä suojausmenetelmiä ja käyttöönottoa. Lisäksi työssä tarkasteltiin aurinkosähköjärjestelmien tyypillisimmien vikaantuvia komponentteja sekä kunnossapitovaiheessa suositeltavia tarkastus- ja huoltotehtäviä. Työssä tehdyn tutkimuksen perusteella tultiin johtopäätökseen, jonka mukaan toimivien, turvallisten sekä suorituskyvyltään optimaalisten aurinkosähköjärjestelmien toteuttaminen ja ylläpito vaatii vahvaa sähkötekniistä osaamista sekä aurinkosähköalan teknisen kehityksen jatkuvaa seuranta. Opinnäytetyötä voitaisiin jatkokehittää tutkimalla seuraavan sukupolven aurinkosähköteknologioiden toteutus- ja kunnossapitoperiaatteita.

Asiasanat: aurinkosähköjärjestelmä, toteutus, kunnossapito, tarkastus, huolto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Building Services Engineering
Electrical Systems

LAIVORANTA, LAURI:
Implementation and Maintenance Principles of Photovoltaic Systems

Bachelor's thesis 85 pages, appendices 4 pages
April 2021

Rapid increase of photovoltaic energy production has created new competence needs in the field of electrical industry. The main purpose of this thesis was to collect information on implementation and maintenance principles of photovoltaic systems from a practical point of view.

The objective of this study was to present an insight into implementing and maintaining a photovoltaic system and to produce instructions to work appropriately with these systems. The research question was read as follows: How is a photovoltaic system implemented and maintained and what to consider along the process?

The study was carried out as a descriptive literature survey. The study was limited to cover microgeneration solar power plants with a nominal power under 100 kVA. The main research materials were respective standards, guides, studies, and surveys.

As a result of this study, it was found out that there are a number of things to consider when implementing and maintaining photovoltaic systems. The main findings, such as the recommendable maintenance tasks, are presented in this report. In conclusion, the findings of this study indicate that it requires a strong electrical competence to implement and maintain functional, safe, and efficient photovoltaic systems.

Key words: photovoltaic system, implementation, maintenance, inspection, service

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	9
2.1	Auringon säteily.....	9
2.2	Aurinkosähköjärjestelmä yleisesti	12
2.2.1	Yleiset ominaisuudet ja asennustavat	12
2.2.2	Sähköenergian mittaus- ja verojärjestelyt.....	16
2.2.3	Taloudellinen kannattavuus	17
2.3	Aurinkosähköjärjestelmien tuotantokapasiteetti	18
2.3.1	Kehitys Suomessa.....	18
2.3.2	Kansainvälinen kehittyminen	20
2.4	Keskeisten komponenttien toimintaperiaate.....	22
2.4.1	Aurinkosähkökenno	22
2.4.2	Aurinkosähköpaneeli	24
2.4.3	Invertteri	28
2.5	Työturvallisuus	30
3	TOTEUTUSPERIAATTEET	33
3.1	Säädöstausta	33
3.2	Komponenttien valinta ja asentaminen	33
3.2.1	Asennusjärjestelmät	35
3.2.2	Aurinkosähköpaneelit	36
3.2.3	Invertterit	36
3.2.4	Sähköiset liitostarvikkeet	37
3.2.5	Erotus- ja kytkinlaitteet	38
3.2.6	Johtojärjestelmät	39
3.3	Suojausmenetelmät	40
3.3.1	Suojaus sähköiskulta.....	40
3.3.2	Suojaus eristysvioilta.....	40
3.3.3	Ylivirtasuojaus	41
3.3.4	Ylikuormitussuojaus.....	46
3.3.5	Suojamaadoitus ja potentiaalintasaus	48
3.3.6	Ylijännite- ja salamasuojaus	49
3.3.7	Estodiodit.....	51
3.3.8	Sähkökeskukset	52
3.4	Suorituskyvyn optimointi	53
3.4.1	Varjostukset.....	54
3.4.2	Suuntaus ja kallistus.....	54

3.4.3 Lämpötila.....	56
3.5 Merkinnät ja dokumentointi	57
3.6 Käyttöönotto	59
4 KUNNOSSAPITOPERIAATTEET	63
4.1 Yleisimmin vikaantuvat komponentit	63
4.2 Turvallisuutta ylläpitävät kunnossapitotehtävät	64
4.2.1 Yleisesti huomioitavia tekijöitä	66
4.2.2 Asennusjärjestelmät	66
4.2.3 Aurinkosähköpaneelit	67
4.2.4 Invertterit ja laitekotelot.....	68
4.2.5 Sähköiset liitokset.....	69
4.2.6 Erotus- ja kytkinlaitteet	70
4.2.7 Johtojärjestelmät	71
4.3 Suorituskykyä ylläpitävät kunnossapitotehtävät	71
4.3.1 Varjostukset ja liitosresistanssit.....	72
4.3.2 Aurinkosähköpaneelien puhtaanapito.....	73
4.3.3 Sähköiset ominaisuudet	74
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	77
LÄHTEET.....	79
LIITTEET	82
Liite 1. Suositeltavat kunnossapitotehtävät	82

LYHENTEET JA TERMIT

AC	Alternating Current, vaihtosähkö
DC	Direct Current, tasasähkö
AM	Air Mass, yksi STC-olosuhteiden suureista, jolla kuvataan ilmassan vaikutusta säteilymäärään
IK	Impact Rating Code, sähkölaitteiden mekaaninen suojausluokitus
IP	International Protection Code, sähkölaitteiden koteloituoluokitus
I_n	mitoitusvirta
I_{SC}	Short Circuit Current, oikosulkuvirta
$I_{SC MAX}$	Short Circuit Current Max, suurin oikosulkuvirta
V_{OC}	Open Circuit Voltage, avoimen piirin jännite
$V_{OC MAX}$	Open Circuit Voltage Max, suurin avoimen piirin jännite
MPPT	Maximum Power Point Tracking, säätötekniikka
STC	Standard Test Condition, standardoidut testiolosuhteet
VA	volttiampeeri, sähköisen näennäistehon yksikkö
W	watti, sähköisen pätötehon yksikkö
Wh	wattitunti, sähköenergian yksikkö

1 JOHDANTO

Uusiutuvien energianlähteiden hyödyntäminen on merkittävässä roolissa energia- ja ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Suomen tavoitteena on nostaa uusiutuvan energian osuus vähintään 51 %:in kokonaisloppuenergiankäytöstä vuoteen 2030 mennessä. Samalla yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien määrä Suomessa on vuosittain likimain kaksinkertaistunut vuodesta 2014 lähtien. Vuoden 2019 lopussa, aurinkosähkön tuotantokapasiteetti oli noin 215 MW, ja määrän odotetaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä 1200 MW:iin. (IEA-PVPS 2020a, 5, 8; Finland's Integrated Energy and Climate Plan 2019, 3, 50.) Aurinkosähkön tuotannon nopean kasvun sekä yhä suurempien kasvuodotusten myötä sähköalalle on muodostunut uusia osaamistarpeita, minkä vuoksi tässä opinnäytetyössä perehdytään aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapitoperiaatteisiin.

Opinnäytetyö tehdään Are Oy:n ylläpito- ja huoltopalveluiden toimeksiantona. Työn pääasiallisena tarkoituksena on selvittää aurinkosähköjärjestelmien toteutus- ja kunnossapitovaiheessa huomioitavia teknisiä asioita käytännön näkökulmasta. Työn tavoitteena on muodostaa lukijalle ymmärrys aurinkosähköjärjestelmän toteutus- ja kunnossapitovaiheen sisällöstä sekä kerätä yhteen tarvittavat tiedot, joiden pohjalta laaditaan yrityksen henkilöstölle tarvittava perehdytys- ja lomakeaineisto aurinkosähköjärjestelmien parissa työskentelyyn.

Tämän opinnäytetyön tutkimuskysymys on seuraava: Miten aurinkosähköjärjestelmä toteutetaan ja pidetään kunnossa sekä mitä asioita eri vaiheissa tulee ottaa huomioon? Opinnäytetyön tutkimus toteutetaan kuvailevana kirjallisuuskatsauksena. Tutkimus rajataan koskemaan yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytkettyjä, nimellisteholtaan alle 100 kVA:n mikrotuotantolaitoksia. Tutkimusaineistona käytetään pääasiassa alaa koskevia standardeja ja oppaita sekä tutkimusmateriaalina tutkimuksia ja selvityksiä.

Opinnäytetyön toisessa kappaleessa käsitellään aurinkoenergiaa ja aurinkosähköjärjestelmiä yleisesti, perehdytään aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kehi-

tykseen, tutustutaan keskeisten komponenttien toimintaperiaatteeseen sekä syvennyttään oleellisiin työturvallisuusseikkoihin. Tavoitteena on määrittää riittävät lähtötiedot järjestelmien parissa työskentelemiseksi, perehtymällä aurinkoenergiasovellusten toiminnan perustaan sekä tutustumalla aurinkosähköjärjestelmien toimintaperiaatteeseen, kehitykseen, komponentteihin ja työskennellessä huomioitaviin turvallisuustekijöihin.

Kolmannessa kappaleessa käsitellään alaa koskevia säädöksiä sekä syvennyttään järjestelmien toteutuksessa huomioitaviin asioihin, kuten komponenttien mitoittamiseen, valintaan ja asentamiseen, suojausmenetelmiin sekä valmiin järjestelmän käyttöönottoon. Tavoitteena on syventyä perusteellisesti aurinkosähköjärjestelmän toteutusperiaatteisiin niin teorian kuin käytännön tasolla sekä muodostaa kattava ymmärrys suojausmenetelmien toimintaperiaatteesta.

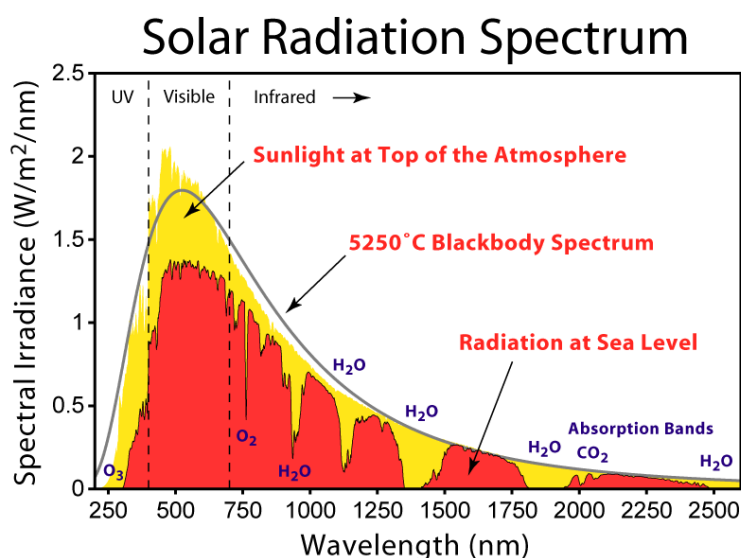
Neljännessä kappaleessa tutustutaan aurinkosähköjärjestelmien tyypillisimmin vikaantuviin komponentteihin sekä esitetään suositeltavia kunnossapito- ja huoltotehtäviä. Tavoitteena on aluksi muodostaa ymmärrys yleisesti vikaantuvista komponenteista, joiden kuntoon tulee erityisesti kiinnittää huomiota koko laitteen elinkaaren ajan. Lopuksi tarkastellaan suositeltavia tarkastus- ja huoltotehtäviä, joilla pyritään varmistumaan sekä aurinkosähköjärjestelmien turvallisuudesta että suorituskyvystä.

2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

2.1 Auringon säteily

Aurinkoenergia perustuu Auringon ytimen fuusioreaktioon, jossa vety fuusioituu heliumiksi vapauttaen samalla energiaa. Ytimen fuusioreaktio vapauttaa sähkömagneettista säteilyä, jota kutsutaan Auringon säteilyksi. Säteily koostuu laajasta sähkömagneettisen spektrin kaistasta, joka kattaa ultraviolettisäteilyn, näkyvän valon sekä lähi-infrapunasäteilyn aallonpituudet. Auringosta vapautuvasta säteilystä noin 5 % on ultraviolettisäteilyä, 43 % näkyvää valoa ja 52 % lähi-infrapunasäteilyä. Auringon säteilemää energiaa voidaan kerätä ja hyödyntää muun muassa lämpö- ja sähköenergiana. (Biernat, Malinowski & Gnat 2013.)

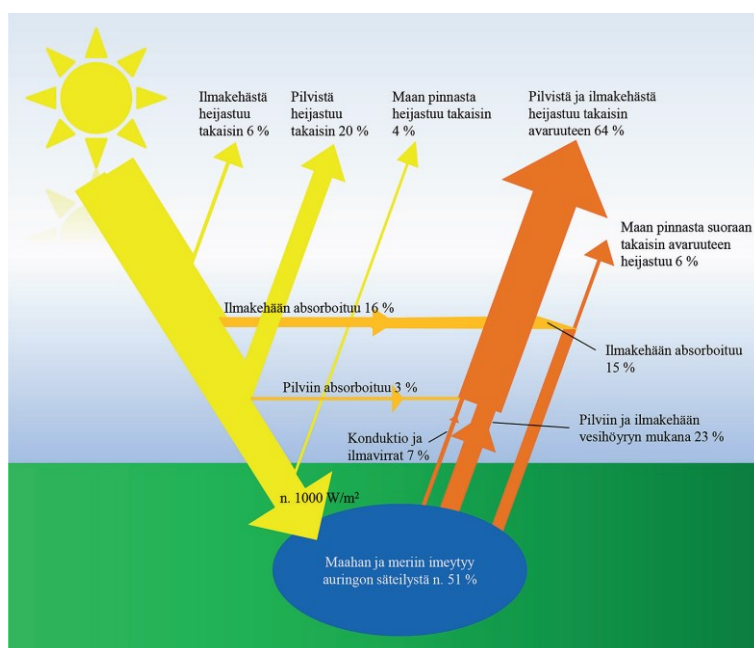
Auringon säteily kulkeutuu koko laajuudessaan ainoastaan Maan ilmakehän ja avaruuden rajalle. Säteilyn vuontiheys ilmakehän ulkorajalla on keskimäärin 1368 W/m^2 , mitä kutsutaan aurinkovakioksi. Kármánin rajalla, noin sadan kilometrin korkeudella merenpinnasta, osa säteilyn aallonpituuksista alkaa absorboitua ja heijastua ilman molekyyleistä. Erityisesti stratosfäärissä oleva otsonikerros absorboi tehokkaasti suurienergistä ultraviolettisäteilyä. (Biernat ym. 2013.) Auringon säteilyn aallonpituusjakauma sekä ilmakehän rajalla että merenpinnan tasolla on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Auringon säteilyn aallonpituusjakauma (Biernat ym. 2013)

Auringon säteilyn aallonpituusjakaama havainnollistavassa kuvassa esitetään keltaisella värillä korostettuna aallonpituusjakauma ilmakehän ulkorajalla, ja punaisella värillä korostettuna jakauma merenpinnan tasolla. Kuvaajista nähdään, miten Auringon säteilyn intensiteetti heikentyy ilmakehän läpi kuljettaessa.

Säteilyn intensiteetti heikentyy sen kulkiessa ilmakehän läpi, ja aurinkovakion vuontiheydestä saapuu maan pinnalle parhaimmillaan lakipisteessä noin 1000 W/m^2 . Maapallon pyöreän muodon vuoksi maahan saapuvan säteilyn intensiteettiin vaikuttaa ilmakehän olosuhteiden lisäksi maantieteellinen sijainti. (ST-käsikirja 40 2017, 10.) Auringon kokonaissäteily muodostuu Auringosta suoraan tuleavasta säteilystä sekä hajasäteilystä. Hajasäteily on maasta heijastuvaa sekä pilvien ja ilmakehän heijastamaa säteilyä. (Motiva 2020a.) Maahan saapuvasta säteilystä noin 30 % heijastuu ilmakehästä, pilvistä sekä maan pinnasta takaisin avaruuteen. Vastaavasti noin 19 % säteilystä absorboituu ilmakehän sekä pilvien molekyyleihin. Jäljelle jäävä 51 %:n osuus absorboituu maahan sekä vesistöihin. (ST-käsikirja 40 2017, 9–10.) Maan säteilytaseen periaate on esitetty kuvassa 2.

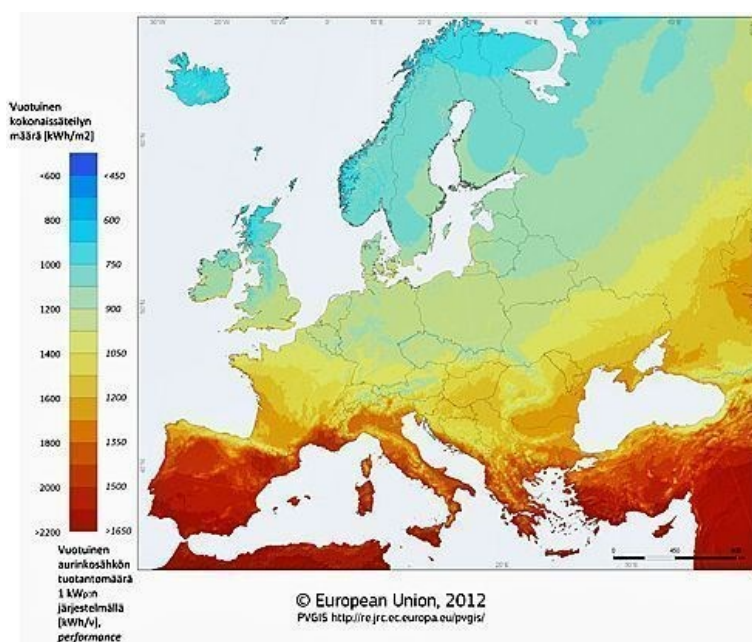


KUVA 2. Maan säteilytase (ST-käsikirja 40 2017, 9)

Säteilytaseen periaatekuvassa esitetään Auringon säteilyenergian kulku ilmakehässä sekä maan säteilytaseen muodostuminen. Säteilytaseen etumerkki määrittää maan lämpenemisen tai kylmenemisen. Auringon asema energiareсурssina on ylivoimainen, sillä maan pinnalle kohdistuva vuotuinen kokonaissäteilyenergia

vastaa Suomessakin noin 2400-kertaisesti vuosittain kulutettua primäärienergiämäärää (RT-ohjekortti 103076 2019, 1).

Aurinkoenergiasovellusten yhteydessä ollaan yleisesti kiinnostuneita vuotuisesta kokonaissäteilymäärästä, joka koostuu sekä suorasta säteilystä että hajasäteilystä. Suomessa hajasäteilyn osuus merkittävä, sillä Etelä-Suomessa noin puolet vuotuisesta kokonaissäteilystä on hajasäteilyä. Auringon vuotuinen kokonaissäteily määrä on Etelä-Suomessa lähes samaa suuruusluokkaa Pohjois-Saksan kanssa. (Motiva 2020a.) Kuvassa 3 on esitetty Auringon vuotuisen kokonaissäteily määrän jakautuminen Euroopassa.



KUVA 3. Auringon vuotuinen kokonaissäteily määrä Euroopassa (Motiva 2020a)

Vuotuista kokonaissäteily määrää havainnollistavasta kuvasta nähdään, miten säteilyn määrä on Suomea huomattavasti suurempi muun muassa Välimeren ympäröivissä maissa. Kokonaissäteilyn vuotuinen määrä on Etelä-Suomessa lähes Keski-Euroopan tasolla. Kuitenkin Keski-Euroopasta poiketen, Suomeen kohdistuva säteily keskittyy kesäkuukausille. (Motiva 2020a.)

Vuotuisen kokonaissäteily määrään vaikuttaa merkittävästi tarkasteltavan pinnan ilmansuunta sekä kallistuskulma. Vaakasuoralle pinnalle kohdistuva vuotuinen kokonaissäteily määrä on Helsingissä noin 980 kWh/m² sekä Sodankylässä

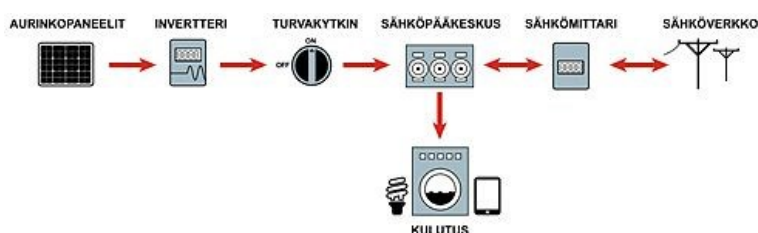
noin 790 kWh/m². Suunnattaessa tarkasteltava pinta 45° kulmassa etelään, vuotuinen kokonaissäteily määrä lisääntyy noin 20 - 30 %. (Motiva 2020a.)

2.2 Aurinkosähköjärjestelmä yleisesti

2.2.1 Yleiset ominaisuudet ja asennustavat

Aurinkosähköenergian tuottaminen perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa Auringon säteilyenergiaa muutetaan sähköenergiaksi aurinkosähköjärjestelmän avulla. Järjestelmän keskeinen toiminta perustuu aurinkosähköpaneelisiin, joilla kerätään ja muutetaan Auringon säteilyenergiaa tasasähköksi. Paneeleilla tuotettu tasasähkö muutetaan edelleen invertterillä vaihtosähköksi kiinteistön sähkölaitteiden hyödynnettäväksi. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.)

Mikäli kaikkea tuotettua sähköenergiaa ei pystytä hyödyntämään kiinteistössä, ylijäämäenergia ohjautuu yleiseen sähkönjakeluverkkoon, jonka välityksellä ylituotettu energia voidaan myydä sähkömarkkinoilla. Tyypillinen yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkosähköpaneeleista, kiinnitys- ja johtojärjestelmästä, invertteristä sekä erotus- ja suojalaitteista. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.) Tyypillisen verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän rakenne on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän rakenne (Motiva 2020e)

Aurinkosähköjärjestelmät voidaan jakaa toimintaperiaatteiden perusteella kahteen kategoriaan: Yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytkettyihin, eli niin sanottuihin on-grid -järjestelmiin sekä yleiseen sähköverkkoon kytkemättömiin, eli niin sanottuihin itsenäisiin off-grid -järjestelmiin. Yleisimpiä ovat on-grid -järjestelmät, jotka

toimivat sähkötekniisesti rinnan yleisen sähköjakeluverkon kanssa. (Motiva 2020e.)

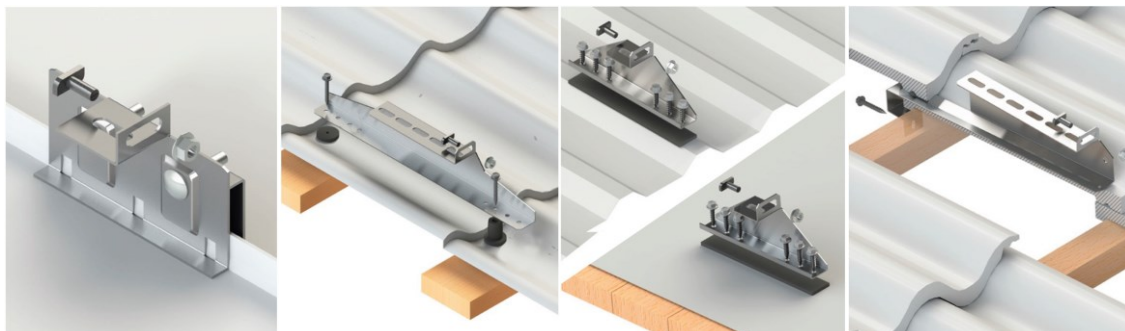
Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän tulee keskeyttää energian tuotanto sähkökatkotilanteessa henkilöturvallisuuden varmistamiseksi. Lisäksi aurinkosähköjärjestelmä on oltava erotettavissa yleisestä jakeluverkosta lukittavalla erotuskytkimellä, johon verkkoyhtiöllä on oltava vapaa pääsy. (Motiva 2020e.) Aurinkosähkön tuottajalla on oikeus liittää vaatimusten mukainen tuotantolaitos yleiseen jakeluverkkoon. Verkonhaltijan tehtävänä on tarjota aurinkosähkön tuotannolle luotettava jakeluverkko sekä taata sähkön jakelun turvallisuus ja toiminta myös tuotantolaitoksen liittämisen jälkeen (Energiateollisuus n.d.)

Yleiseen sähköjakeluverkkoon kytkemättömiä off-grid -järjestelmiä hyödynnetään yleisesti kohteissa, joissa jakeluverkkoon liittyminen ei ole mahdollista tai kannattavaa, kuten saarissa. Off-grid -järjestelmällä voidaan kohteen vaatimusten mukaan tuottaa joko tasa- tai vaihtojännitettä, sekä tarvittaessa molempia. Aurinkosähköpaneelit voidaan kytkeä lataussäätimen välityksellä suoraan kulu- tuspisteisiin, tai paneelien tuottama sähköenergia voidaan varastoida akkuihin, mikäli tuotanto ja kulutus eivät osu samaan hetkeen. Myös off-grid -järjestelmiin voidaan asentaa invertteri vaihtojännitteellä toimivien sähkölaitteiden hyödyntä- miseksi. Off-grid -järjestelmien keskeisimmät komponentit ovat aurinkosähköpa- neelit, lataussäädin sekä kaapeloinnit. Lisäksi järjestelmään voi kuulua myös akusto, invertteri tai varaenergianlähde, kuten aggregaatti. (Motiva 2020d.)

Aurinkosähköpaneelit asennetaan tyypillisesti rakennusten katoille tai maastoon. Harjakattoisissa rakennuksissa paneelit asennetaan yleensä lappeen mukaisesti ja tasakattoisissa rakennuksissa erillisiin asennustelineisiin. Kiinnitysjärjestelmiä on saatavilla käytännössä kaikille katemateriaaleille. Harjakatoille tyypillisessä kiinnitysratkaisussa paneelit kiinnitetään alla oleviin profiilikiskoihin, jotka taas kiinnitetään joko itse katemateriaaliin tai sen alla oleviin ruoteisiin. Tasakatoilla asennustelineet asennetaan tyypillisesti niin sanotusti kelluvasti, jolloin katema- teriaalia ei läpäistä, ja telineisiin asennetaan lisäpainoja tuulikuormien varalta.

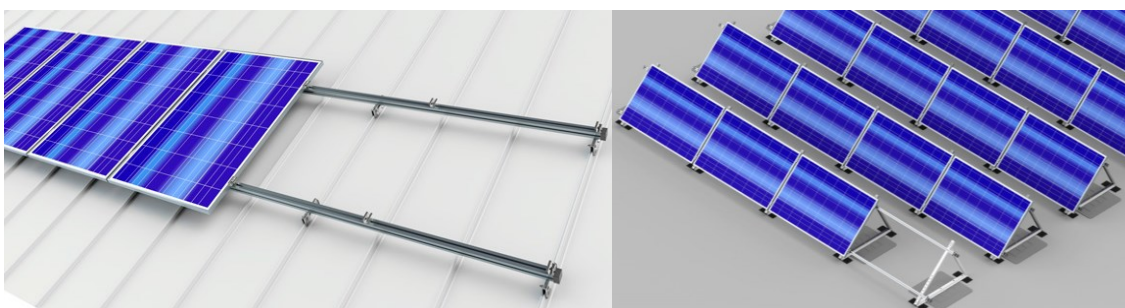
Modernit paneelit voidaan myös esimerkiksi integroida osaksi vesikattoa tai julki- sivumateriaaleja, sekä paneelit voivat toimia parvekkeiden, terassien tai katosten

valokatteina ja näkösuojina. (RT-ohjekortti 103076 2019, 2, 9–10.) Kuvassa 5 on esitetty eri katemateriaaleille soveltuvia kattokiinnikkeitä, joihin profiilikiskot kiinnitetään.



KUVA 5. Eri katemateriaaleille soveltuvia kattokiinnikkeitä (Orima n.d.)

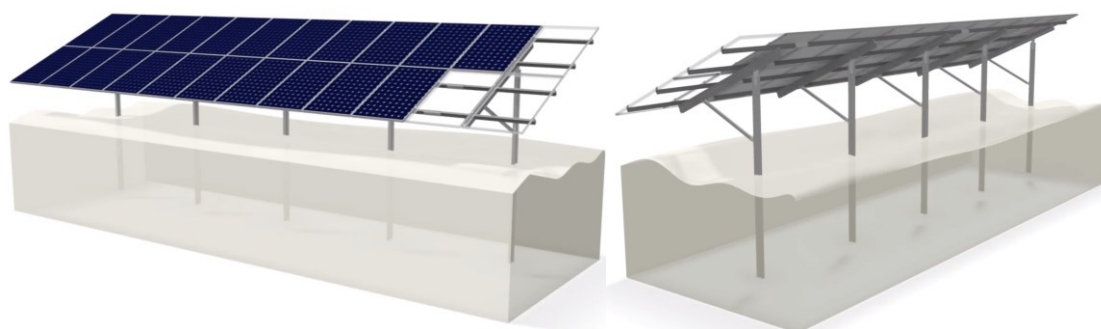
Kuvassa esitetään vasemmalta oikealle lueteltuna rivi-, kuviopelti-, profiilipelti- ja huopa- sekä tiilikatteelle soveltuvat kattokiinnikkeet. Rivikatteessa kiinnike puristetaan katteen pystysauman ympärille, jolloin katetta ei tarvitse lävistää. Pelti- ja huopakatteissa kiinnitys tehdään joko katemateriaaliin tai alla oleviin ruoteisiin, jolloin kiinnikkeen ja katteen väli tulee tiivistää. Tiilikatossa kiinnitys tehdään tiilien alle ruoteisiin. Kuvassa 6 on esitetty paneelien kiinnitysmenetelmiä harja- ja tasakatoilla.



KUVA 6. Aurinkosähköpaneelien kiinnitysmenetelmiä (Orima n.d.)

Kuvassa esitetään vasemmalla harjarakenteiseen rivikatteeseen asennetut profiilikiskot, joihin on kiinnitetty paneeleita. Oikealla esitetään tasakatolle asennettuja paneeleita, jotka on asennettu niin sanottuihin asennuskolmioihin. Asennuskolmioiden avulla paneelit voidaan asentaa haluttuun kallistuskulmaan.

Suuret, teholtaan satojen tai tuhansien kilovolttiampeerien aurinkosähköpuistot asennetaan yleensä maatalineisiin. Maa-asennuksessa paneelit asennetaan metallirakenteisiin telineisiin kahteen tai kolmeen riviin. Telinerivien välisen etäisyyden tulee olla riittävän suuri, jotta eri paneelirivit eivät varjosta toisiaan. (RT-ohjekortti 103076 2019, 2, 11.) Kuvassa 7 on esitetty maa-asennuksen toteutusperiaate.



KUVA 7. Aurinkosähköpaneelien maa-asennus (Mounting Systems n.d.)

Kuvassa esitetään aurinkosähköpaneelien maatalineasennuksen toteutusperiaate. Maatalineiden perustus voidaan toteuttaa esimerkiksi ruuvipaaluilla, maahan juntattavalla perustuksella tai betoniperusteisella perustuksella. Soveltuva perustustapa tulee määrittää kohteen maaperän ominaisuuksien perusteella. (Orima n.d.)

Maa-asenteiset paneelistot voidaan myös asentaa seurantajärjestelmän avulla Aurinkoa seuraaviksi. Kaksiakselisella seurantajärjestelmällä paneelit voidaan suunnata täsmällisesti Aurinkoa kohti, jolloin voidaan olosuhteista riippuen saavuttaa puolitoista- tai jopa kaksinkertainen energian vuosituotanto. Seurantajärjestelmällä saavutettava hyöty kuitenkin vähenee pilvisellä säällä, jolloin saatavilla on käytännössä pelkästään hajasäteilyä. Suomessa hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on verrattain suuri, noin 40 – 50 %, mikä pienentää seurantajärjestelmien kannattavuutta. Lisäksi seurantajärjestelmän kustannukset ovat kiinteää asennusta merkittävästi suuremmat, mikä edelleen vähentää seurantajärjestelmien hyödyntämisen kannattavuutta. (Motiva 2020c.)

2.2.2 Sähköenergian mittaus- ja verojärjestelyt

Aurinkosähköjärjestelmiä on saatavilla sekä 1- että 3-vaiheisina ja tehon kannalta lähes kaikkiin käyttötarkoituksiin. Pientaloissa hyödynnettyjen laitteistojen nimellisteho on tyypillisesti muutamista kilovolttiampeereista kymmeneen kilovolttiampeereihin. Liikekiinteistöihin asennetut laitteistot ovat tyypillisesti teholtaan kymmeniä tai satoja kilovolttiampeereja, kun taas suurten aurinkosähköpuistojen nimellisteho on yleisesti muutamia megavoltiampeereja. Alle kahden MVA:n tuotantolaitteistot määritellään sähkön pientuotannoksi. Vastaavasti alle 100 kVA:n tuotantolaitteistot määritellään mikrotuotantolaitoksiksi. (Energiateollisuus n.d.)

Tuotantolaitteistojen nimellisteho vaikuttaa sähköenergianmittaus- ja verojärjestelyihin. Nimellisteholtaan yli 100 kVA:n pientuotantolaitokset tulee varustaa erillisellä tuotannon sähköenergiamittauksella. Tällöin pientuottajan on myös rekisteröidyttävä sähköverovelvolliseksi Tullin rekisteriin. Mikäli tuotantolaitoksen vuosien energiantuotto on alle 800 MWh, sähkön pientuottajan on annettava vuosittain veroilmoitus tuottamastaan sähköstä, mutta sähköveroja ei tule suoritettavaksi. Jos taas tuotantolaitoksen vuosituotto on yli 800 MWh, pientuottajan tulee antaa kuukausittain veroilmoitus sekä suorittaa sähköverot oman tuotantonsa kulutuksesta. (ST-käsikirja 40 2017, 32, 34–35.)

Alle 100 kVA:n mikrotuotantolaitokset eivät vaadi erillismittausta tuotannolle, vaan mittauksen järjestämisestä on vastuussa sähköverkkoyhtiö. Vastaavasti mikrotuotantolaitokset ovat vapautettuja sähköverovelvollisuudesta, pois lukien tilanteessa, jossa yksittäisen kuluttajan enintään 50 kVA:n mikrotuotantolaitoksella tuotettua sähköenergiaa myydään verovuoden aikana enemmän kuin verkosta ostetaan. Tällöin ylijäämänsähkön myyntitulo katsotaan kotitalouden verotettavaksi ansiotuloksi. Kuitenkaan kotitalouden sähköntuotantoa ei tarvitse pääsääntöisesti ilmoittaa veroilmoituksella, vaan tämä tulee kyseeseen lähinnä erikoistapauksissa. (ST-käsikirja 40 2017, 32, 35–36.)

Mittausjärjestelyjä koskevaa lainsäädäntöä muutettiin valtioneuvoston asetuksella vuoden 2020 lopulla siten, että se mahdollistaa sähkönkulutuksen ja -tuotannon taseselvitysjakson sisäisen netotuksen ja hyvityslaskennan, sekä paikall-

listen energiayhteisöjen perustamisen (1133/2020). Lainsäädännön muutos parantaa merkittävästi aurinkosähköjärjestelmien kannattavuutta, minkä seurauksena voidaan odottaa aurinkosähköjärjestelmien aiempaakin nopeampaa yleistymistä.

Netotuksen ja hyvityslaskennan toteuttaminen on jakeluverkonhaltijalle tois-
taiseksi vapaaehtoista. Edellä mainitut palvelut tulevat kaikille sähkökäyttöpai-
koille hyödynnettäväksi viimeistään 1.1.2023, kun palvelujen toteuttaminen kes-
kitetään sähkökaupan keskitetyn tiedonvaihdon yksikköön Datahubiin. Samalla
taseselvityksen aikajakson kesto lyhenee nykyisestä yhdestä tunnista 15 minuut-
tiin. (1133/2020.)

2.2.3 Taloudellinen kannattavuus

Aurinkosähköä ei tulisi tuottaa yli kiinteistön sähköenergiantarpeen parhaan ta-
loudellisen hyödyn sekä järjestelmän takaisinmaksuajan lyhentämiseksi. Syynä
tähän on se, että aurinkosähköjärjestelmällä tuotetusta, ja verkkoon syötetystä
sähköenergiasta maksetaan tyypillisesti pohjoismaisen sähköpörssin tuntikohtai-
seen Spot-hintaan sidottu korvaus, joka on yleensä aurinkosähkön tuotantohui-
pun aikaan alle puolet vastaavan ostosähkön kokonaishinnasta. Lisäksi ainoas-
taan kiinteistössä tuotetulla ja kulutetulla aurinkosähköllä vältetään ostosähkön
yhteydessä maksettavat siirtomaksut sekä verot. (RT-ohjekortti 103076 2019, 7.)

Aurinkosähköjärjestelmien taloudellisen kannattavuuden edellytyksenä on, että
suurin osa tuotetusta energiasta pystytään hyödyntämään kiinteistön sähkölait-
teissa. Kannattavuuden kannalta toinen merkittävä tekijä on järjestelmän tarkoi-
tuksenmukainen suorituskyky. Takaisinmaksuajan lyhentämiseksi järjestelmän
tulisi toimia parhaalla mahdollisella suorituskyvyllä. Energiantuotantoon vaikutta-
vat oleellisesti muun muassa varjostukset, katon rakenteet sekä paneelien suun-
taus.

Aurinkosähkön tuotannolle tyypillisesti hyvin soveltuvia kohteita ovat muun mu-
assa liike-, toimisto- ja teollisuuskiinteistöt sekä terveydenhuollon palvelukiinteis-
töt, joissa sähkön kulutus ajoittuu tyypillisesti samaan hetkeen aurinkosähkön

tuotantohuipun kanssa. Tuotannon hyödyntämisen kannalta edullista on se, että näissä kiinteistöissä on yleisesti suuritehoisia sähkölaitteita, kuten kylmäkoneita, joiden energiankulutusta voidaan kattaa aurinkosähkön tuotannolla. Toimitilakiinteistöissä on myös yleisesti aurinkosähköjärjestelmien asennukselle hyvin soveltuvat tasakatot, joihin Aurinko paistaa usein esteettä. (RT-ohjekortti 103076 2019, 7–8.)

Koulukiinteistöissä aurinkosähkön hyödynnettävyyteen vaikuttaa merkittävästi kesäajan käyttöaste. Mikäli kiinteistön käyttö on kesällä vähäistä, voidaan aurinkosähköä hyödyntää kannattavasti pääasiassa vain talotekniikan tarpeisiin. Vastaavasti asuinkiinteistöissä aurinkosähkön kannattavaa hyödynnettävyyttä rajaa sähkön kulutukselle tyypillinen ajallinen vaihtelu. Tuleva tuotannon ja kulutuksen netotus sekä hyvityslaskentamenettely kuitenkin parantaa hyödynnettävyyttä tältä osin. Jotta kannattamaton verkkoon myynti vältetään, järjestelmän mitoitus jää yleisesti hyvin pieneksi. Kannattavuutta heikentää edelleen pienitehoisten järjestelmien verrattain suuremmat hankintakustannukset suuritehoisempiin järjestelmiin nähden. (RT-ohjekortti 103076 2019, 8.)

Aurinkosähköjärjestelmän hankintaan voi olla myös muita kannustimia, kuten halu tukea uusiutuvan energian kehitystä tai halu parantaa energiaomavaraisuutta. Aurinkosähkön tuotanto huomioidaan myös energiatodistuksen E-lukulaskennassa, mikä voi osaltaan kannustaa aurinkosähköjärjestelmän hankintaan. (RT-ohjekortti 103076 2019, 1.)

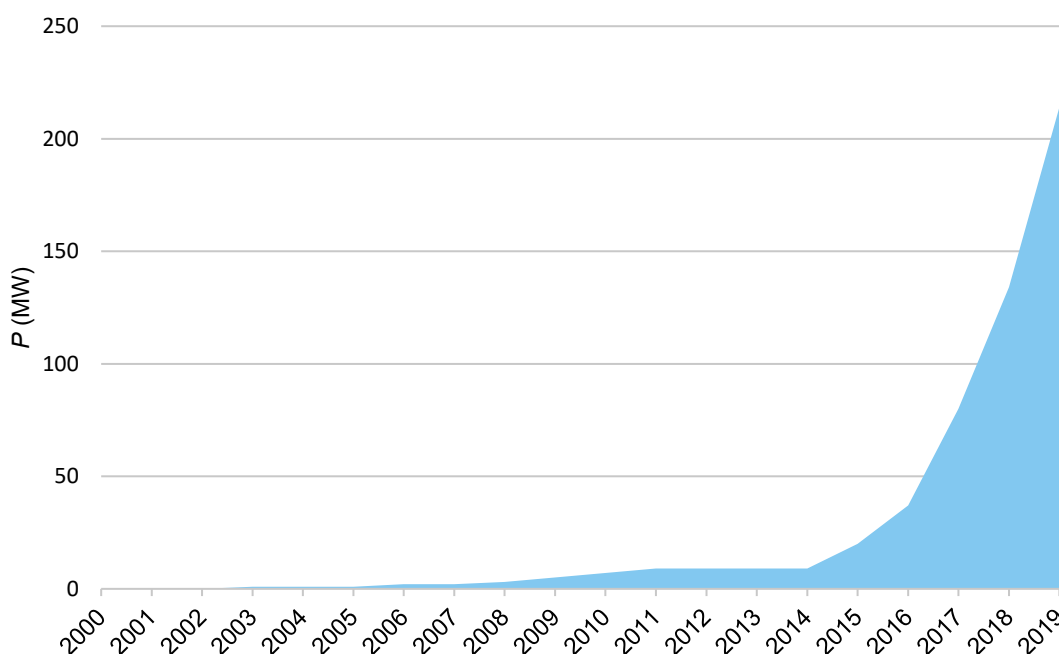
2.3 Aurinkosähköjärjestelmien tuotantokapasiteetti

2.3.1 Kehitys Suomessa

Tyypillinen Suomessa hyödynnetty aurinkosähköjärjestelmä on pitkään ollut pieni, sähkönjakeluverkkoon kytkemätön erillinen off-grid -järjestelmä, jolla on tyypillisesti voitu tuottaa vapaa-ajan asuntojen valaistuksen, jääkaappien ja kulluttajalaitteiden vaatima sähköenergia. Suomessa on yli 500 000 vapaa-ajan

asuntoa, joista yli 50 000 on varustettu off-grid -aurinkosähköjärjestelmällä. (IEA-PVPS 2020a, 5.)

Vuodesta 2010 lähtien sähköverkkoon kytkettyjen on-grid -järjestelmien määrä on kasvanut. Suomessa sähköverkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien energiantuotantokapasiteetti on vuosittain likimain kaksikertaistunut vuodesta 2014 lähtien. Vuonna 2019 aurinkosähkön kokonaistuotantokapasiteetti oli 214,2 MW, joista off-grid -järjestelmien osuus on noin 5,2 % ja on-grid -järjestelmien osuus noin 94,8 %. (IEA-PVPS 2020a, 5, 8.) Kuvassa 8 on esitetty aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kumulatiivinen kehittyminen Suomessa vuosina 2000 - 2019.



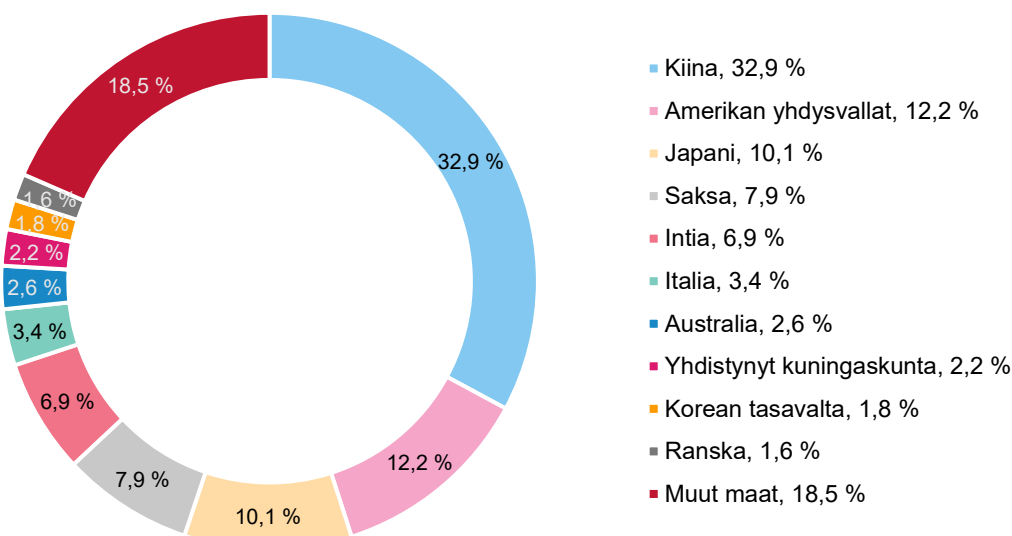
KUVA 8. Aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kumulatiivinen kehittyminen Suomessa (luvut IEA-PVPS 2020b, 84)

Kuvasta nähdään, miten aurinkosähköjärjestelmien suosio on kasvanut voimakkaasti 2010-luvun aikana. Vuonna 2018 Suomessa arvioitiin olevan noin 20 000 – 25 000 sähköverkkoon kytkettyä aurinkosähköjärjestelmää, joista suurin osa on pientalojen katoille asennettuja järjestelmiä (IEA-PVPS 2020a, 8). Suomen Euroopan komissiolle toimittamassa yhdenmennyssä energia- ja ilmastosuunnitelmassa arvioidaan aurinkosähkön kokonaistuotantokapasiteetin vuonna 2030 olevan 1200 MW (Finland's Integrated Energy and Climate Plan 2019, 50).

Vaikkakin aurinkosähköjärjestelmät ovat menneinä vuosina leistyneet huomattavasti, niiden tuottaman energian osuus Suomen kokonaissähkönkulutuksesta on pieni. Vuonna 2020 aurinkosähköllä tuotettiin 0,3 % Suomessa kulutetusta sähköenergiasta (Energiateollisuus 2021, 7).

2.3.2 Kansainvälinen kehittyminen

Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna vuoden 2019 loppuun mennessä käyttöönotettujen aurinkosähköjärjestelmien kokonaistuotantokapasiteetti oli 623,3 GW. Tästä kapasiteetista lähes 72 % prosenttia on asennettu edeltävän viiden vuoden aikana. (IEA-PVPS 2020b, 10.) Niin Suomessa kuin globaalistikin asennettujen järjestelmien määrässä havaitaan markkinoiden voimakas kasvu suhteellisen lyhyessä ajassa. Aurinkosähköjärjestelmien globaalin tuotantokapasiteetin jakautuminen merkittävimpien tuotantomaiden kesken vuonna 2019 on esitetty kuvassa 9.

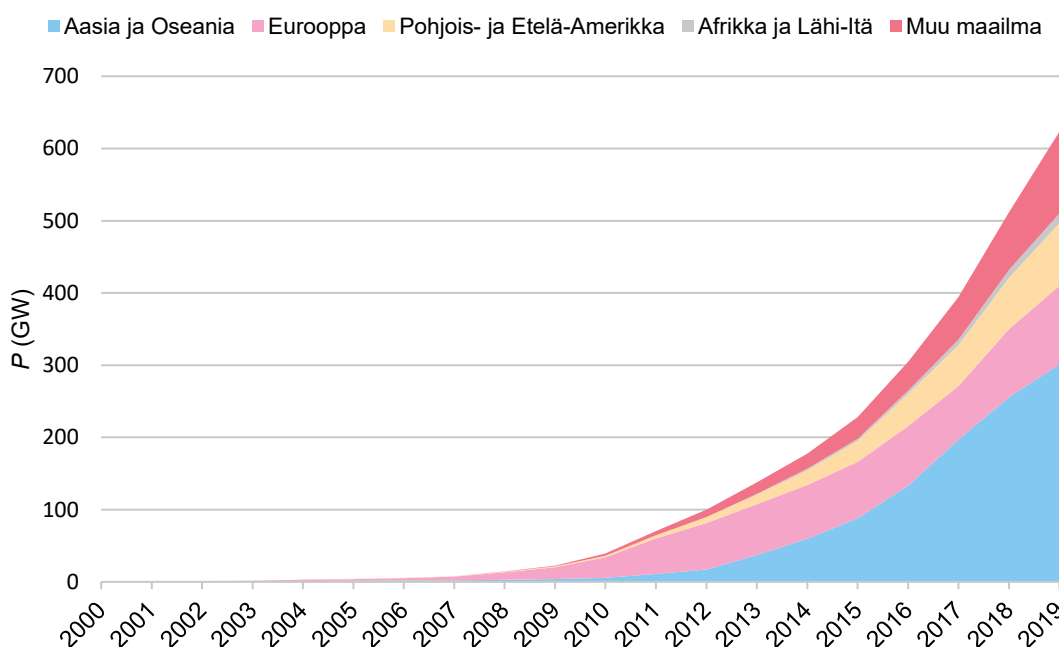


KUVA 9. Aurinkosähkön globaalin tuotantokapasiteetin jakautuminen merkittävimpien tuotantomaiden kesken vuonna 2019 (luvut IEA-PVPS 2020b, 14)

Kuvasta nähdään, miten Kiinan tuotantokapasiteetti on maailman suurin. Seuraavaksi suurimmat tuotantokapasiteetit ovat Amerikan yhdysvalloilla sekä Japanilla,

joilla kummallakin on noin 10 % osuus globaalista tuotantokapasiteetista. (IEA-PVPS 2020b, 11.)

Kuitenkin aurinkosähkön suurin tuotantokapasiteetti asukasta kohti on Australiassa arvolla 644 W per asukas. Toiseksi suurin tuotantokapasiteetti asukasta kohti on Saksassa arvolla 589 W per asukas ja kolmanneksi suurin kapasiteetti arvolla 500 W per asukas on Japanissa. Sijalla neljä on Belgia ja sijalla viisi Alankomaat. (IEA-PVPS 2020b, 11.) Kuvassa 10 on esitetty aurinkosähkölaitteiden tuotantokapasiteetin globaali kumulatiivinen kehittyminen maantieteellisesti jaoteltuna. Kuvassa ”muulla maailmalla” tarkoitetaan niitä maita, jotka eivät kuulu IEA-PVPS:n maakohtaiseen seurantaan.



KUVA 10. Aurinkosähkön globaalin tuotantokapasiteetin kumulatiivinen kehittyminen maantieteellisesti jaoteltuna (luvut IEA-PVPS 2020b, 84)

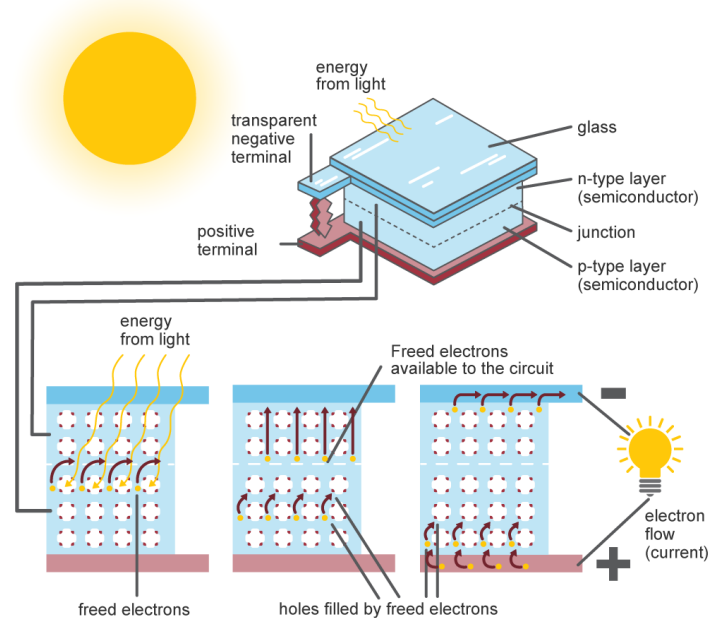
Eurooppa oli aurinkosähkön tuotannon edelläkävijä lähes vuosikymmenen ajan, ja edusti vuoteen 2012 asti yli 70 % globaalista tuotantokapasiteetista. Vuodesta 2013 lähtien aurinkosähkölaitteiden suosio on kasvanut voimakkaasti erityisesti Aasiassa ja Amerikan mantereella. Edellisten seitsemän vuoden ajan Kiina on vuosittain kasvattanut tuotantokapasiteettiaan eniten. (IEA-PVPS 2020b, 12, 23.)

2.4 Keskeisten komponenttien toimintaperiaate

2.4.1 Aurinkosähkökenno

Aurinkosähköpaneeli koostuu tyypillisesti sarjaan kytketyistä aurinkosähkökennoista. Yksittäinen aurinkosähkökenno on puolijohdediodirakenne, joka kykenee muuttamaan vastaanottamansa Auringon säteilyenergian tasavirraksi. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.) Kennon kyky tuottaa sähkövirtaa perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa Auringon säteily irrottaa alkuaineen pinnalta elektronin. Auringon säteily koostuu energiaa kuljettavista fotoneista, eli valohiukkasista, jotka luovuttavat kennoon osuessaan energiansa kennojen elektroneille, jolloin elektronit pystyvät irrottautumaan. (ST-käsikirja 40 2017, 10.) Kennojen erilaisilla kytkennöillä voidaan muodostaa järjestelmälle halutun suuruinen käyttöjännite sekä virta (Motiva 2020b). Valosähköisen ilmiön toteutuminen aurinkosähkökennossa on esitetty kuvassa 11.

Inside a photovoltaic cell



Source: U.S. Energy Information Administration

KUVA 11. Valosähköisen ilmiön toteutuminen aurinkosähkökennossa (EIA 2020)

Kuvassa nähdään ilmiön alkutilanne, jossa kennon P-N-liitoksen tyhjennysalueelle saapuva Auringon säteilyenergia irrottaa puolijohteen elektroneja. Kennon

sisäinen sähkökenttä saa elektronit kulkeutumaan kohti N-materiaalia ja vastavasti aukot kohti P-materiaalia. Virittyminen muodostaa materiaaleihin potentiaalieron, jonka avulla vapaat elektronit voidaan johtaa ulkoiseen virtapiiriin sähköisten sovellusten hyödynnettäväksi. Prosessi toistuu niin pitkään kuin Auringon säteilyenergiaa on saatavilla. Valosähköisen ilmiön toimintaperiaate on esitetty tarkemmin esimerkiksi ST-käsikirjassa 40.

Opinnäytetyön kirjoitushetkellä aurinkosähköpaneelien vallitsevana valmistusteknologiana on ensimmäisen sukupolven kiteiseen piihin perustuvat paneelit, joiden markkinaosuus on noin 90 % kaikista paneeleista. Paneeleita valmistetaan sekä yksikiteistä (mono-Si) että monikiteisestä (poly-Si) piistä, joista yksikiteinen pii on hyötysuhteeltaan parempi, mutta kalliimpi valmistaa. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.) Monikiteistä piitä voidaan valmistaa sulattamalla yksikiteisen piin valmistuksessa syntyvä leikkuu- ja hiontajäte massaksi, joka kiteytetään haluttuun muotoon. Sulatuksessa piin kiderakenteeseen muodostuu virheitä, jonka vuoksi materiaalia kutsutaan monikiteiseksi piiksi. Kidevirheet voivat estää elektronin poistumisen virheen alueelta, minkä vuoksi monikiteisen piin hyötysuhde on yksikiteistä heikompi. (ST-käsikirja 40 2017, 13.) Kiteinen piikkenno on rakenteeltaan hauras, ja paksuudeltaan vain 160-240 μm , joten se tarvitsee suojakseen rakenteen kosteutta ja mekaanista rasitusta vastaan (RT-ohjekortti 103076 2019, 4).

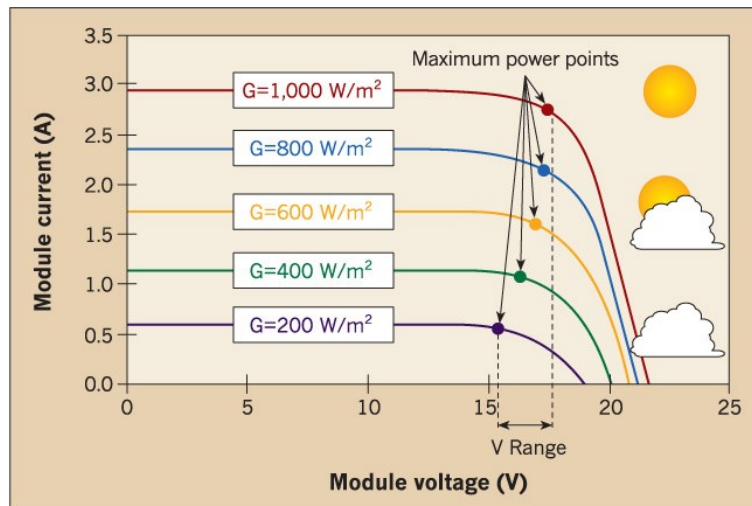
Toisen sukupolven aurinkosähkökennot perustuvat ohutkalvotekniikkaan, jossa eri materiaaleista muodostetut kerrokset tuottavat sähkövirtaa Auringon säteilyn eri aallonpituuksista. Valmistuksessa hyödynnetään yleisesti amorfista piitä (a-Si) sekä kadmium-telluridi- (CdTe) tai kupari-indium-gallium-selenidi- (CIGS) -yhdisteitä. Ohutkalvopaneelien valmistamiseen amorfisesta piistä tarvitaan merkittävästi vähemmän piitä kuin kiteisten piipaneelien valmistamiseen. Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on kuitenkin karkeasti arvioiden vain puolet kiteisen piipaneelin hyötysuhteesta. Ohutkalvopaneeleissa käytetty kadmium vaikeuttaa paneelien valmistusta sekä käyttöä myrkyllisyytensä vuoksi. (ST-käsikirja 40 2017, 12–13.) Toisen sukupolven kennoilla voidaan valmistaa joustavia aurinkosähköpaneeleja, jotka kestävät paremmin kuljetus- ja asennusrasituksia. Lisäksi ohutkalvopaneelit eivät ole yhtä herkkiä varjostuksille tai korkeille lämpötiloille kuin kiteisestä piistä valmistetut paneelit. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.)

Kolmannen sukupolven aurinkokennot edustavat uusinta teknologiaa, ja pohjautuvat orgaanisiin sekä väriainepohjaisiin materiaaleihin (RT-ohjekortti 103076 2019, 4). Väriaineherkistettyjen aurinkosähkökennojen toiminnan voidaan katsoa perustuvan keinotekoiseen fotosynteesiin. Väriaineherkistetyt aurinkosähkökennot voivat olla erimuotoisia, erivärisiä tai värittömiä. Väriaineherkistettyjen kennojen valmistaminen on piipohjaisia kennoja halvempaa ja käytettävät materiaalit ovat myrkyttömiä. (ST-käsikirja 40 2017, 16.) Kolmannen sukupolven kennoihin perustuvia paneeleja voidaan myös valmistaa painamalla tai tulostamalla, mikä voi johtaa kustannustason merkittävään alenemiseen. Kuitenkin kolmannen sukupolven kennoteknologian yhteydessä on ongelmia pitkän aikavälin kestävyysden kanssa, joten kyseiset kennot eivät vielä ole varteenotettava vaihtoehto yleiseen käyttöön. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.)

2.4.2 Aurinkosähköpaneeli

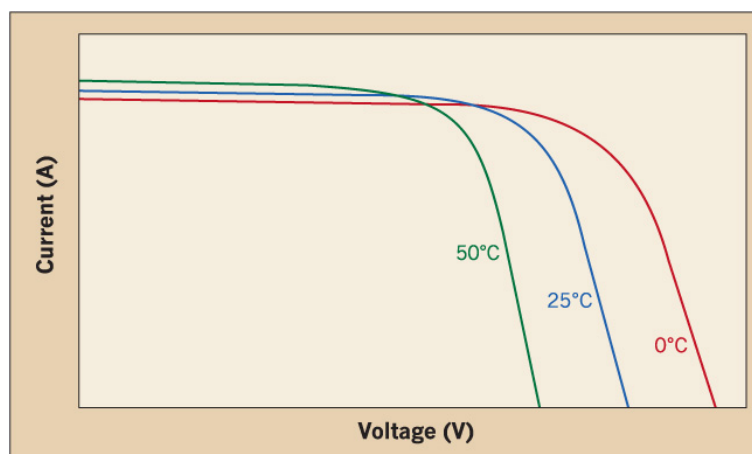
Yksittäinen aurinkosähkökenno tuottaa tyypillisesti vain noin 0,5 voltin jännitteen, minkä vuoksi aurinkosähköpaneelit koostuvat useista sarjaankytketyistä kennoista riittävän jännitteen muodostamiseksi. Perinteinen aurinkosähköpaneeli valmistetaan tyhjiölaminoimalla sarjaan kytketyt kiteiset piikennot sekä kytkentälangat lasilevyn ja taustakalvon väliin. Vaurioherkkä lasirakenne suojataan alumiinikehyksellä. Paneeli voidaan myös laminoida kahden lasilevyn väliin ilman suojaavaa kehystä tai valmistaa kaksipuoleisesti. Kaksipuolisella aurinkosähköpaneelilla voidaan kerätä säteilyä kahdesta ilmansuunnasta sekä hyödyntää tehokkaammin hajasäteilyä. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4.)

Paneelien tuottaman jännitteen ja virran arvot ovat voimakkaasti riippuvaisia ympäristön olosuhteista, kuten säteilyvoimakkuudesta, lämpötilasta sekä varjostuksista. Paneelien tuottaman jännitteen taso ei ole niin riippuvainen Auringon säteilyvoimakkuudesta kuin voisi yleisesti olettaa, vaan paneelien tuottaman jännitteen tasoon vaikuttaa määräävästi kennon lämpötila. Kiteinen piikenno tuottaa jo 200 W/m^2 säteilyvoimakkuudella noin 90 % standardiolosuhteissa määritetystä nimellijännitteestään. Kuitenkin säteilyvoimakkuus vaikuttaa määräävästi kennon kykyyn tuottaa tasavirtaa. (EC&M 2012.) Kuvassa 12 on esitetty paneelin jännite-virta-ominaiskäyriä eri säteilyintensiteeteillä.



KUVA 12. Aurinkosähköpaneelin jännite-virta-ominaiskäyriä eri säteilyintensiteeteillä (EC&M 2012)

Kuvassa nähdään, miten paneeli kykenee tuottamaan lähes nimellisjännitteensä riippumatta säteilyvoimakkuuden tasosta. Säteilyvoimakkuus on taas suoraan verrannollinen paneelin kykyyn tuottaa tasavirtaa. Korkeampi säteilyvoimakkuus mahdollistaa suurempien elektronimäärien irtoamisen, ja näin ollen suuremman tasavirran muodostumisen. Paneelin jännitteentuottokyky on erityisen riippuvainen kennojen lämpötilasta. Paneelin lämpötilariippuvuutta on havainnollistettu kuvassa 13.

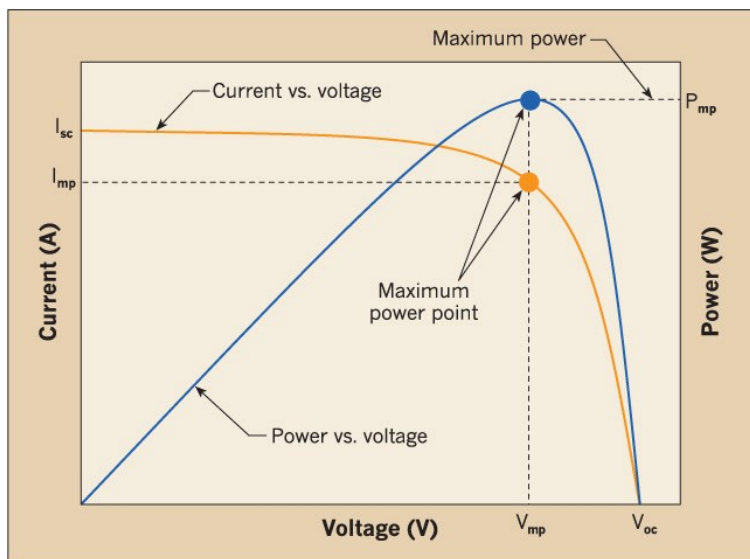


KUVA 13. Lämpötilan vaikutus aurinkosähköpaneelin jännitteentuottoon (EC&M 2012)

Kuvassa nähdään, miten paneelin kyky tuottaa jännitettä on riippuvainen kennojen lämpötilasta. Standardiolosuhteita pienemmillä lämpötiloilla paneelit kykene-

vät tuottamaan nimellistä suuremman jännitteen, kun taas suuremmilla lämpötiloilla jännitteentuottokyky heikentyy. Lämpötila vaikuttaa erityisesti kiteisen piikennon jännitteentuottokykyyn.

Aurinkosähköpaneelin tuottama sähköteho muodostuu paneelin tuottaman tasajännitteen ja -virran tulosta. Tehon suuruuteen vaikuttaa kuormituksen laatu, joka paneeliin on kytketty. Kun paneeliin ei ole kytketty kuormitusta, piirin virta on nolla, ja paneelit tuottavat suurimman jännitteen, eli avoimen piirin jännitteen. Kun taas paneeliin kytketään pieni-impedanssinen kuormitus, kuten oikosulku, piirin virta on suurimmillaan ja paneelien jännite putoaa nolnaan. Mikäli paneelin halutaan toimivan suurimmalla mahdollisella teholla, tulee järjestelmään kytkeä sellainen kuormitus, jolla piirin virran ja jännitteen tulo on suurin mahdollinen. Suurimman tehon piste, maximum power point eli MPP, voidaan määrittää paneelin ominaiskäyrältä. MPP-pisteen määrittäminen on esitetty kuvassa 14.

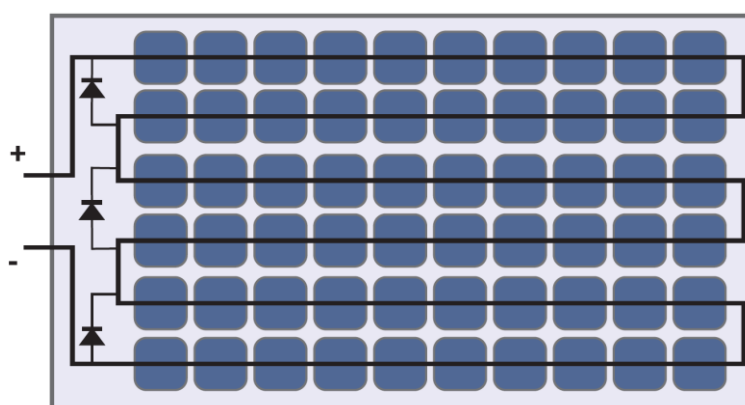


KUVA 14. Aurinkosähköpaneelin MPP-pisteen määrittäminen (EC&M 2012)

Kuvassa nähdään, miten paneelin tuottama suurin teho määrittyy paneelin tuottaman jännitteen ja virran tulosta. Maksimitehopisteessä jännitteen ja virran tulo on suurimmillaan. Koska ympäristön olosuhteet vaikuttavat paneelin tehotuottoon, ja olosuhteet vaihtuvat jatkuvasti, paneeleihin kytkettävä kuormitus ei voi olla vakio, mikäli paneelin halutaan toimivan parhaalla mahdollisella suorituskyvyllä. Tämän vuoksi paneeleihin kytkettävä kuormitus vaatii yleisesti aktiivista

säätötekniikkaa, jolla kuormitusta muutetaan ympäristön olosuhteiden mukaisesti. Tarvittava säätötekniikka toteutetaan tyypillisimmin vaihtosuuntaajan avulla.

Varjostukset vaikuttavat aurinkosähköpaneelien tehontuottokykyyn kennojen sisäisen sarjakytkentärakenteen vuoksi. Sarjakytkentärakenteen vuoksi, paneelien tuottaman tehon arvon määrittää heikoimmin tuottava kenno. Varjostusten aiheuttamien tehohävikkien vähentämiseksi paneeleissa käytetään yleisesti niin sanottuja bypass- eli ohitusdiodeja, joiden avulla varjostunut paneelilohko ohitetaan, ja tehohävikki minimoidaan. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.) Aurinkosähköpaneelin rakenne on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15. Aurinkosähköpaneelin rakenne (RT-ohjekortti 103076 2019, 4)

Kuvassa nähdään, miten paneeli koostuu yksittäisistä sarjaankytketyistä kennoista. Kennorivien rinnalle on kytketty ohitusdiodit, joita on yhdessä paneelissa tyypillisesti kolme kappaletta. Paneeli jaetaan ohitusdiodeilla kolmeen yhtä suureen varjostuslohkoon. Varjon osuessa esimerkiksi paneelin kulmaan, varjostuneen kennoketjun jännite laskee. Varjostuksen aikaansaama jännite-epätasapaino aktivoi kennoketjujen välisen ohitusdiodin, jolloin virtapiiri ohjautuu varjostuneen kennoketjun ohi, ja varjostunut kennoketju ikään kuin sammuu, eikä heikennä muun paneelin energiantuotantoa. Paneelit ovat erityisen herkkiä lyhyen sivun suuntaisille varjoille, sillä varjostuksen ollessa riittävän suuri, aurinkopaneeli ajautuu kokonaisuudessaan ohitustilaan, jolloin koko paneelin energiantuotantopotentiaali jää hyödyntämättä. (ST-käsikirja 40 2017, 20–23.)

Ohitusdiodit ovat olemassa olevissa järjestelmissä yleisin tekninen keino vähentää varjostusten vaikutusta. Varjostusten aiheuttamia haittoja voidaan vähentää myös paneelikohtaisilla MPPT-säätimillä, jolloin puhutaan niin sanotuista mikroinverttereillä varustetuista paneeleista, sekä paneelikohtaisilla DC-optimoijilla (RT-ohjekortti 103076 2019, 6). Kuitenkin tällöin koko järjestelmän toimintaperiaate muuttuu niin sanotusta perinteisestä järjestelmästä, ja ratkaisu tehdään jo paneeleita määritettäessä.

2.4.3 Invertteri

Termi invertteri on englannin kielen johdannainen, joka on muodostunut yleisnimitykseksi keskuslaitteelle, johon paneelistot liitetään. Eri asiayhteyksissä invertterillä voidaan tarkoittaa esimerkiksi verkkoonliityntälaitetta, vaihtosuuntaajaa, varaajavaihtosuuntaajaa tai akkusäädintä. Tyypillisessä on-grid -järjestelmässä invertteri on aurinkosähköjärjestelmän keskuslaite, johon paneelistot kytketään, ja joka vastaa tärkeimmistä sähköteknisistä toiminnoista, kuten tasasähkön muuttamisesta vaihtosähköksi, paneelipiirien säätötekniikasta, sähkönjakelun suojauksesta sekä piirien kytkin- ja erotustoiminnoista. (ST-käsikirja 2017, 50.)

Vaihtosuuntauksen lisäksi inverttereiden tärkeänä tehtävänä on paneelipiirien tehonsäätö. Aurinkosähköpaneelien optimaalisen toimintapisteen hakemiseksi käytetään yleisesti MPPT-tekniikkaa. MPPT-säätö koostuu sanoista Maximum Power Point Tracking. MPPT-säädin on vaihtosuuntaajan säätötekniinen toiminto, joka etsii jatkuvasti aurinkosähköpaneelien jännite-virta-käyrältä parhaan tehon tuottavaa pistettä kuormitusta muuttamalla. (RT-ohjekortti 103076 2019, 2.) MPPT-säätimen toiminnot perustuvat erilaisiin jännite- ja virtatasojen muuntopiireihin, joilla saavutetaan nopea ja tasainen sekä portaaton säätö (ST-käsikirja 40 2017, 18).

MPPT-säätö toimii paneeliketjukohtaisesti, joten yhteen MPPT-säätimeen kytkettävien paneelien tulee olla samaa tyyppiä, asennettu samaan kaltevuuskulmaan sekä suunnattuna samaan ilmansuuntaan. Vaihtosuuntaajat eroavat toisistaan muun muassa sisääntulojen ja MPPT-säätimien määrän suhteen. Pienimmissä vaihtosuuntaajissa voi olla vain yksi MPPT-piiri. Mikäli yhteen vaihtosuuntaajaan

halutaan kytkeä useampi eriävissä olosuhteissa oleva paneeliketju, tulee vaihtosuuntaajassa olla yhtä monta itsenäistä MPPT-piiriä, jotta kaikkien paneeliketjujen tuotto voidaan optimoida. (RT-ohjekortti 103076 2019, 4–5.)

Muita tapoja energiantuotannon optimoimiseksi ovat mikroinvertterit sekä DC-optimoijat. Mikroinvertterit ovat tyypillisesti yhteen tai kahteen paneelin integroitua vaihtosuuntaajia. Tällöin paneelien ulostulojännite on suoraan kiinteistön sisäverkkoon sopivaa vaihtojännitettä. Mikroinverttereiden avulla yksittäiset paneelit toimivat aina parhaassa toimintapisteessä. Mikroinverttereiden heikkoutena ovat suuremmat yksikkökustannukset sekä mahdollisten huoltokohteiden suuri määrä, minkä vuoksi mikroinverttereitä hyödynnetään lähinnä vain pientaloissa. (RT-ohjekortti 103076 2019, 5.)

DC-optimoijat ovat perinteisten vaihtosuuntaajien ja mikroinvertterien välimuoto. DC-optimoijat ovat paneelikohtaisia DC-DC-säätöelektroniikkalaitteita, jotka mahdollistavat paneelikohtaisen MPPT-säädön sekä tuotannon seurannan, mutta ne eivät muuta tasajännitettä vaihtojännitteeksi. DC-optimoijia voidaan lisätä myös jälkiasenteisena, jolloin ne soveltuvat erityisen hyvin optimointikeinoksi järjestelmiin, joihin on muodostunut aikojen saatossa esimerkiksi varjojen lähteitä. DC-optimoijilla saavutetaan samat edut kuin mikroinverttereillä, mutta yksikkökustannukset eivät ole yhtä suuria. (RT-ohjekortti 103076 2019, 5.)

Säätötekniikan ohella invertterien tärkeitä tehtäviä ovat suojaustoiminnot sekä sähkönlaadun varmistaminen. Aurinkosähkijärjestelmä ei saa heikentää liittämispisteen sähkön laatua merkittävästi. Sähköverkkoyhtiö määrittää kriteerit tuotantolaitoksen sallituille häiriötasoille. Liittämiskohdan jännitteen laadun tulee täyttää yleisen jakelujännitteen ominaisuudet standardin SFS-EN 50160 vaatimusten mukaan sekä liittämiskohdan harmonisen kokonaissärön tulee olla alle 8 %. (ST-käsikirja 40 2017, 39–40.)

On-grid -järjestelmissä inverttereiden tulee toteuttaa saarekekäytön estosuojaus, jossa aurinkosähkijärjestelmä kytkeytyy irti yleisestä jakeluverkosta jakelujännitteen tai verkkotaajuuden poiketessa normaaleista suoritusarvoista. Jännite- ja taajuussuojauksella on tarkoitus varmistaa, että tuotantolaitos ei syötä verkkoon huonolaatuista sähköä, joka voi rikkoa muiden verkonkäyttäjien laitteita. Lisäksi

suojauksella on tarkoitus varmistua siitä, että tuotantolaitos ei syötä sähkökatkon aikana takajännitettä verkkoon, mikä voi aiheuttaa henkilö- tai omaisuusvahinkoja. Edellä esitettyjen toimintojen varmistamiseksi inverttereiden suojaustoimintojen tulee täyttää verkkoyhtiön sekä Fingridin VJV2018:n (Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset) asettamat vaatimukset soveltuvin osin. Ajantasaiset vaatimukset ja sovellettavat standardit tulee tarkastaa verkkoyhtiöltä. (ST-käsikirja 40 2021, 47–48.)

2.5 Työturvallisuus

Aurinkosähköjärjestelmien parissa työskennellessä on oleellinen vaara altistua sähköiskuille sekä valokaarille, minkä vuoksi riittävä perehdytys järjestelmän riskeihin on tarpeen. Töiden suorittamisessa tulee käyttää soveltuvia henkilösuojaimia sekä noudattaa turvallisia työmenetelmiä ja yleisiä sähkötyöturvallisuussäädöksiä. Keskeisiä riskejä ovat korkeat tasajännitteet, järjestelmäkomponenttien tasavirran katkaisukyky, takasyöttövaara sekä vaihtosuuntaajien kondensaattorien varautuminen. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 44.) Lisäksi on tärkeää huomioida, että paneeliston tasasähköosan jännitteen ylittäessä 120 voltia, kosketussuojaamattomien komponenttien käsittelyssä tulee noudattaa jännitetyö-määräyksiä (ST-käsikirja 40 2017, 108).

Keskeisten komponenttien toimintaperiaate ja ominaisuudet tulee tuntea sekä laitteista tulee osata tunnistaa paljaat jännitteiset osat. Lisäksi on osattava selvittää jännitteisten osien nimellisjännite. Normaaleiden olosuhteiden virta- ja jännitetasot tulee tuntea, jotta normaalista poikkeavat sekä vaaralliset olosuhteet osataan tunnistaa. Kaikkien komponenttien oletetaan olevan jännitteisiä suurimalla tasajännitteellä, kunnes jännitteettömyys on varmistettu. Tasavirran katkaisuun soveltumattomat komponentit tulisi olla varustettu varoitusmerkinnöillä, joita tulee noudattaa. Soveltumattoman liitoksen avaaminen kuormitettuna voi johtaa laitevikaan, valokaareen, tulipaloon tai henkilövahinkoon. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 44.)

Mikäli invertteri ilmoittaa maadoitusviasta, oleellisia paljaita johtavia osia tulee käsitellä jännitteisenä. Lisäksi invertterin parissa työskennellessä tulee energian

syöttö katkaista vaihto- ja tasasähköosasta sekä tulee varmistua tasasähköosillan kondensaattorien varausten purkautumisesta. Aurinkosähköjärjestelmän komponentit voivat myös toimia kotina eläimille, joiden kohtaamista tulee osata odottaa ja tarpeen mukaan varoa. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 44.)

Erinäisissä työtehtävissä on usein tarpeen tehdä erotustoimenpiteitä, jotka voivat olla yksi aurinkosähköjärjestelmien vaarallisimmista työtehtävistä, ellei niitä tehdä oikein. Yleisesti ottaen on turvallisinta erottaa vaihtosähköosa ennen tasasähköosaa. Ennen minkään erottimen avaamista, järjestelmä tulee sammuttaa joko kytkemällä vaihtosuuntaaja pois päältä, tai mikäli tämä ei ole mahdollista, tulee avata vaihtosähköpiirin kuormanerotin, jolloin saarekekäytönestotoiminta sammuttaa vaihtosuuntaajan transistorisillan. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 29–30, 44.)

Tyypillinen erotustoimenpide voi olla paneelin ja paneeliketjujen johdotuksen erottus. Erottaminen alkaa vaihtosuuntaajan sammuttamisella sekä mahdollisten liittämätökeskusten erottamisella. Tämän jälkeen tulee varmistua, että johtimissa ei kulje virtaa. Edellä esitettyjen vaiheiden jälkeen liittimet voidaan erottaa soveltuvalta työkalulla. Piirin virran tarkastaminen on tärkeää, sillä aurinkosähköliittimillä ei ole kuorman katkaisukykyä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 32.)

Aurinkosähköjärjestelmien parissa työskennellessä tulee muistaa, että paneelit kehittävät aina jännitteen valon osuessa niihin. Paneeliketjun positiivisen ja negatiivisen navan välille muodostuu sitä suurempi jännite, mikä enemmän ketjussa on paneeleita kytkettynä. Paneeliketjun nimellisjännite on tyypillisesti yli 500 voltia tasajännitettä. Johtimia käsitellessä tulee varoa erityisesti valokaaren syttymistä. (RT-ohjekortti 103076 2019, 12.)

Aurinkosähköjärjestelmien parissa työskennellään tyypillisesti katoilla, minkä vuoksi työt tulee suunnitella huolellisesti etukäteen. Suunnittelussa tulee tunnistaa kattotyöskentelylle tyypilliset riskit. Katoilla työskenneltäessä tulee käyttää pehmeäpohjaisia turvakenkiä, säänmukaisia työvaatteita sekä kussakin työvaiheessa tarvittavia henkilökohtaisia suojaimia, kuten työkasineitä, suojalaseja sekä suojakypärää. (RT-ohjekortti 103076 2019, 12.)

Pientalojen katot ovat tyypillisesti työturvallisuuden kannalta erityisen vaativia, sillä asianmukaisia kulkusiltoja, nousuteitä tai putoamissuojaimien kiinnityspisteitä ei ole aina saatavilla. Tällöin tulee harkita henkilönostimen käyttöä mahdollisuuksien mukaan tai vaihtoehtoisesti katto tulee varustaa tarpeellisilla putoamissuojainköysillä. Suurempien kiinteistöjen katoilla on yleensä asianmukaiset kulku- ja nousutiet sekä mahdollisesti kattopollareita putoamissuojainten kiinnittämiseen. Kuitenkin katoilla työskenneltäessä tulee aina käyttää turvavaljaita ja -köysiä sekä varmistua kiinnityspisteiden soveltuvuudesta. (RT-ohjekortti 103076 2019, 12.)

3 TOTEUTUSPERIAATTEET

3.1 Säästöstausta

Kaikkien sähkötöiden toteuttamisessa tulee huolehtia sähköasennuksia koskevien lakien, asetusten, määräysten sekä ohjeiden noudattamisesta. Säädöksistä velvoittavin on sähköturvallisuuslaki (1135/2016), joka velvoittaa asennukset tehtäviksi turvallisesti. Sähköturvallisuuslaissa velvoitetaan suorittamaan asennukset sähköturvallisuusviranomaisen, eli turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukesin, laatiman standardiluettelon teosten sekä siinä lueteltujen muiden ohjeiden mukaisesti. (ST-käsikirja 40 2017, 30.)

Aurinkosähköjärjestelmien toteuttamisessa on olennaisimmin noudatettava sähköasennusstandardisarjan SFS 6000 vaatimuksia. Sarjassa erityisesti aurinkosähköjärjestelmiä koskevia osia ovat 7-712, joka esittää vaatimukset erikoistilojen ja -asennusten vaatimuksille koskien aurinkosähköjärjestelmiä sekä standardin osa 5-55, jonka kohta 551 käsittelee pienjännitteisten generaattorilaitteistojen vaatimuksia. (Tukes 2020.) Yleiseen sähköjakeluverkkoon kytkettävien aurinkosähköjärjestelmien dokumentaation, käyttöönottestien ja tarkastusten vaatimuksia käsitellään standardissa SFS-EN 62446-1. Vastaavien järjestelmien kunnossapidon vaatimuksia käsitellään standardin toisessa osassa SFS-EN 62446-2.

3.2 Komponenttien valinta ja asentaminen

Aurinkosähköjärjestelmille ominaisia piirteitä sähköturvallisuuden kannalta ovat komponenttien asennusolosuhteet, yhteensopivuus ja vaatimustenmukaisuus, tasasähkön ominaisuudet sekä aurinkosähköjärjestelmien takajännitevaara. Joihenkin järjestelmien yhteydessä tulee myös kyseeseen akustojen aiheuttamat vaatimukset sekä sähköisesti etäisten järjestelmien yhteydessä sähköliittymien rajallisten oikosulkuvirtojen kanssa toimiminen. (ST-käsikirja 40 2017, 90.)

Aurinkosähköpaneelien valmistaja määrittää paneelien tekniset nimellisarvot yhdenmukaisissa STC-vakiotestiolosuhteissa. STC-olosuhteissa määritettynä eri paneelien arvot ovat yhteneväisiä ja vertailukelpoisia toisiinsa nähden. Standardiolosuhteissa Auringon vaakatason säteily määrä on 1000 W/m^2 , aurinkosähkökennon lämpötila on 25 °C sekä ilmassan AM-luku on 1,5 (IEC 62548 2016, 14). Aurinkosähköjärjestelmän kaikkien komponenttien mitoitus ja valintaan vaikuttaa merkittävästi suunnitellun paneeliston kytkentärakenteen muodostaman virtapiirin jännitteen- ja virrantuotto-ominaisuudet. Rakennuksiin asennettavien aurinkosähköjärjestelmien suurin tasajännite tulee olla korkeintaan 1000 voltia (IEC 62548 2016, 26).

Järjestelmän komponenttien, kuten invertterien, johtojärjestelmän sekä erotus- ja kytkinlaitteiden, mitoitusjännitteen määrittää paneeliston avoimen piirin suurin tyhjäkäyntijännite $V_{OC \text{ MAX}}$. Avoimen piirin suurin tyhjäkäyntijännite muodostuu paneeliketjun yksittäisten paneelien summajännitteestä, joka korjataan vastaamaan suurinta odotettua jännitettä. Suurin odotettu jännite esiintyy ympäristön lämpötilan ollessa alimmillaan. Arvo voidaan laskea standardin SFS 6000-7-712 liitteen B ohjeistuksen mukaan. Mikäli asennuskohteen odotettua alinta lämpötilaa tai paneelin lämpötilakerrointa ei tunneta, suurimpana tyhjäkäyntijännitteen arvona voidaan käyttää paneeliketjun STC-olosuhteen tyhjäkäyntijännitteen arvoa kerrottuna arvolla 1,2. (SFS 6000-7-712 2017, 15, 24.)

Vastaavasti edellä esitettyjen komponenttien mitoitusvirran määrittää paneeliston suurin oikosulkuvirta $I_{SC \text{ MAX}}$. Suurimman oikosulkuvirran arvo muodostuu paneeliketjun STC-olosuhteiden oikosulkuvirran arvosta, joka kerrotaan vähintään korjauskertoimen arvolla 1,25. Korjauskertoimen arvoa on suurennettava määrättyissä ympäristöolosuhteissa, kuten paneeliston altistuessa suurille heijastuksille tai suurille säteilyvoimakkuuksille. (SFS 6000-7-712 2017, 15, 25.)

Verkkoon liitettävän aurinkosähköjärjestelmän suurinta sallittua tehoa rajaa sähköliittymää syöttävän jakeluverkon sähköinen vahvuus. Mikrotuotantolaitoksen käynnistymisen tai verkosta pois putoamisen ei tule aiheuttaa yli 4 % muutosta liittymispisteen jännitteessä. Jännitteenmuutosehdon toteutumisesta voidaan varmistua seuraavan ehdon avulla: $S_k \geq 25 \cdot S_N$. Yhtälössä S_k on liittymispisteen

kolmivaiheinen oikosulkuteho ja S_N on tuotantolaitoksen nimellisteho. (Energiateollisuus 2016, 3–4.)

Edellä esitetyn ehdon perusteella jännitteenmuutoksen voidaan olettaa olevan alle 4 %, jos liittymispisteen kolmivaiheinen oikosulkuteho on vähintään 25-kertainen aurinkosähköjärjestelmän nimellistehoon nähden. Yhtälöä voidaan käyttää vain, mikäli tuotantolaitoksen kytkentävirta on lähes nimellisvirran suuruinen. Esimerkiksi tyypillisen pientalon 3 x 25 ampeerin sähköliittymän oikosulkuvirran minimiarvoksi taataan 250 A. Kyseisen liittymän kolmivaiheinen oikosulkuteho on 172,5 kVA, jolloin jännitteenmuutosehdon toteutumiseksi kohteeseen voitaisiin asentaa nimellisteholtaan enintään 6,9 kVA:n aurinkosähköjärjestelmä. (Energiateollisuus 2016, 3–4.)

3.2.1 Asennusjärjestelmät

Asennusjärjestelmien toteuttamisessa on kiinnitettävä huomiota erityisesti tuulen ja lumen aiheuttamiin rasituksiin. Toteuttamiselle ei voida antaa yleispäteviä ohjeita, vaan ratkaisut tulee toteuttaa jokaiseen kohteeseen yksilöllisesti. Sekä asennustelineet että aurinkosähköpaneelien kehykset valmistetaan tyypillisesti eloksoidusta tai anodisoidusta alumiinista. Katoilla suositellaan yleisesti käytettävän alumiinia materiaalina sen keveyden sekä UV-säteilyn ja korroosion kestävyden takia. (ST-käsikirja 40 2021, 148, 153.)

Aurinkosähköjärjestelmään kohdistuvaan tuulikuormaan vaikuttaa muun muassa asennuskohteen maastoluokka, korkeus, katon kallistus sekä katon rakenteiden kestävyys. Tuulikuorman huomiointi on järjestelmän elinkaaren varmistamiseksi tärkeää. Tuulikuormat tulee huomioida standardin SFS 1991-1-3/4 vaatimusten mukaisesti. Lisäksi asennusjärjestelmille on usein määritetty suunnitteluohje, jota tulee noudattaa. (ST-käsikirja 40 2021, 149.)

Tuulikuorman tarkastelun ohella tulee kiinnittää huomiota asennusjärjestelmän lumikuormankestävyyteen. Aurinkosähköpaneelien ja asennusjärjestelmien valmistajat ilmoittavat painon, joka heidän tuotteisiinsa voidaan kohdistaa. Kattokiin-

nikkeiden ja profiilikiskojen sijoittelulla sekä riittävällä määrällä voidaan varmistua, että lumikuormankesto ei ylitä. Lisäksi tulee varmistaa kattorakenteiden, ja kiinnityskohtien kestävyys lumikuorman alla. (ST-käsikirja 40 2021, 149.)

3.2.2 Aurinkosähköpaneelit

Järjestelmässä käytettävien aurinkosähköpaneelien tulee täyttää asianmukaisten sähkölaitestandardien, kuten SFS-EN 61730-1, SFS-EN 61215 sekä SFS-EN 61646 vaatimukset (SFS 6000-7-712 2017, 14). Paneeliketjun avoimen piirin jännitteen V_{OC} ylittäessä 120 voltia, tulee käyttää joko II-luokan rakennetta tai vastaavaa eristystä (ST-käsikirja 40 2017, 91). Paneelien asennuksessa tulee noudattaa paikallisia rakennusmääräyksiä sekä käytäntöjä.

Paneelien ja asennuspinnan väliin suositellaan yleisesti jätettävän vähintään noin 10 cm tuuletusrako. Riittävällä tuuletusraolla pyritään välttämään paneeliston lämpötilan nousemista, ja näin ollen parantamaan laitteiston suorituskykyä. Lisäksi riittävä tuuletusrako ehkäisee lumi- tai jääpatjojen muodostumista paneeliston alle. Sulavat lumi- ja jääpatjat voivat aiheuttaa vahinkoja muun muassa repimällä johtoja ja johtoreittejä. Riittävän tuuletusraon lisäksi paneelien kytkentäjohdot tulee luotettavasti kiinnittää paneelien alle sekä johtoteille. (ST-käsikirja 40 2021, 148.)

3.2.3 Invertterit

Invertterit tulee mitoittaa paneeliketjujen avoimen piirin suurimman jännitteen sekä suurimman oikosulkuvirran mukaan. Laitteet voidaan asentaa sekä sisälle että ulos. Sisäkäyttöön tarkoitetut laitteet ovat tyypillisesti koteloituokaltaan IP20 tai tiiviimpiä ja ulkokäyttöön tarkoitetut laitteet IP55 tai tiiviimpiä. Ulos asennettavien sähkölaitteiden iskunkestävyysluokan on oltava standardin SFS-EN 62262 mukaan vähintään IK07 sekä koteloituokan on oltava vähintään IP44 standardin SFS-EN 60529 mukaisesti. Ulos asennettavat sähkölaitteet tulee sijoittaa niin, että ne eivät jää lumen tai jään alle talvisin. (ST-käsikirja 40 2017, 91–92.) Invertterien tulee täyttää asianmukaisten sähkölaitestandardien, kuten

SFS-EN 62109-1 sekä SFS-EN 62109-2 vaatimukset (SFS 6000-7-712 2017, 14).

Invertterit voivat toimiessaan tuottaa lämpöä jopa 10 %:n teholla nimellistehostaan. Tästä syystä laitteet tulee asentaa tuulettuvasti riittäväillä ilmaväleillä. Ulkotiloissa jäähtymistä heikentävien lisäkotelointien käyttöä tulee välttää. Suuntaajien toimintalämpötila-alue on yleisesti - 25 °C ja + 60 °C välillä. Laitteet voivat toimintalämpötila-alueen yläpäässä alkaa rajoittaa toimintaansa sisäisen lämpötilan nousun sekä komponenttien eliniän lyhenemisen estämiseksi. (ST-käsikirja 40 2017, 91–92.)

3.2.4 Sähköiset liitostarvikkeet

Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien liitostarvikkeiden tulee olla sähköisesti ja mekaanisesti yhteensopivia sekä käyttöympäristöönsä soveltuvia. Liitostarvikkeita valittaessa on syytä varmistaa eri liitinvalmistajien tuotteiden yhteensopivuus. (SFS 6000 7-712 2017, 17.) Liitostarvikkeita valitessa ja asennettaessa on hyvä huomioida, että liittimien huolimattomasta asentamisesta tai löysästä liitoksesta johtuvat viat on tunnistettu tilastollisesti merkittävimmäksi vikojen aiheuttajaksi (IEC 62548 2016, 27).

Tasasähköosassa käytettävien liitostarvikkeiden tulee täyttää standardien SFS-EN 50521 tai SFS-EN 62852 vaatimukset. Mikäli tasasähköosan liitoksiin on pääsy muillakin kuin sähköalan ammattilaisilla tai opastetuilla henkilöillä, liitosten tulee olla avattavissa vain työkalulla tai avaimella. Vaihtoehtoisesti liitokset voidaan sijoittaa koteloon, joka on avattavissa vain avaimella tai työkalulla. (SFS 6000 7-712 2017, 17.) Nimellisjännitteeltään yli 1000 VDC laitteistoissa tulee rajata pääsy paneelistöön, kaapelointeihin ja suojalaitteisiin vain sähköalan ammattihenkilöille (IEC 62548 2016, 26).

3.2.5 Erotus- ja kytkinlaitteet

Yleisen sähköjakeluverkon kanssa rinnan toimiva generaattorilaitteisto, kuten aurinkosähköjärjestelmä, on varustettava laitteilla, joilla se voidaan erottaa yleisestä jakeluverkosta. Erotuslaitteena voi toimia sähköliittymän pääkytkin tai generaattorilaitteiston pääkytkin. Kytkimien tulee olla jatkuvasti jakeluverkon haltijan käytettävissä. Erotuslaitteiden toteutustavasta tulee sopia paikallisen jakeluverkon haltijan sekä liittymän haltijan kesken. (SFS 6000-5-55 2017, 11.) Jakeluverkonhaltijoilla on yleisesti omat vaatimuksensa sekä ohjeistuksensa generaattorilaitteistojen erottamisen toteuttamiseksi.

Aurinkosähköjärjestelmän invertteri tulee voida erottaa sekä tasasähkö- että vaihtosähköpuolelta. Erotusvaatimus toteutuu vähimmillään invertteriin integroidulla tasajännitepuolen erotuskytkimellä sekä vaihtosähköpuolen ylivirtasuojilla sekä erotuskytkimellä. Erotuskytkimien tulee olla lukittavia sekä varustettu joko asennonosoituksella tai näkyvällä avausvälillä. (ST-käsikirja 40 2017, 97.) Lisäksi voi olla hyödyllistä asentaa tasasähköpiiriin invertteristä erilliset erotuskytkimet, joilla mahdollistetaan invertterin helppo huolto tai vaihto.

Tasasähköosan erotuskytkimen tulee olla tasasähkökäyttöön soveltuva kuormanerotin tai erottamiseen soveltuva katkaisija. Mikäli valitun laitteen ominaisuudet tätä edellyttävät, tulee asennuksessa ottaa huomioon myös järjestelmän napaisuus. Napaisuutta tarkasteltaessa yleistä sähköjakeluverkkoa pidetään tehollisena ja aurinkosähköjärjestelmää kuormituksena. Tasasähköosassa mahdollisesti syntyvien valokaarien estämiseksi tulee kuormitettuna erottaminen estää. Laitteiden, joilla tasavirtapiiri voidaan avata, mutta jotka eivät omaa tarpeellista kuormankatkaisukykyä, valtuuttamaton tai tahaton käyttö tulee estää. Tällaisia laitteita voivat olla esimerkiksi varokkeet ja ylijännitesuojat. Tahaton käyttö voidaan estää esimerkiksi sijoittamalla kojeet lukittuun tilaan tai lukitsemalla laitteen käyttö. (SFS 6000-7-712 2017, 20–21.)

3.2.6 Johtojärjestelmät

Tasasähköosan kaapeloinnilla tarkoitetaan paneeliston ja invertterin tuloliittimien välistä kaapelointia. Tasasähköosassa käytettävien kaapeleiden tulee täyttää standardin SFS-EN 50618 vaatimukset, soveltua tasasähkökäyttöön, mitoitusjännitteen on oltava suurempi tai yhtä suuri kuin paneeliston suurin jännite sekä kaapelien tulee soveltua asennusympäristöön. Kaapelit on valittava ja asennettava siten, että oikosulkujen ja maasulkujen riskit ovat mahdollisimman pieniä. Tämä toteutuu hyödyntämällä joko metallivaipattomia yksijohtimisia kaapeleita tai käyttämällä eristettyjä johtimia, jotka asennetaan erikseen eristeaineisiin asennusputkiin tai johtokanaviin. (SFS 6000-7-712 2017, 16.)

Paneeliketjujen syöttökaapelityyppeinä käytetään yleisesti kuparijohtimisia aurinkosähköjärjestelmiin suunniteltuja niin sanottuja aurinkosähkökaapeleita tai muita tavallista kestävämpiä kaapelityyppejä. Ulkotiloissa kaapelien tulee olla UV-suojattuja sekä jännitekestoisuudeltaan vähintään 1000 voltia. Paneeleihin asennetaan tyypillisesti tehtaalla pikaliittimillä varustetut liitäntäjohdot, joilla paneelit kytketään toisiinsa. Tehdasasenteisten liitäntäjohtojen poikkipinta-ala on yleisesti joko 4 tai 6 mm². Yleisimmin käytetty pikaliitintyyppi on MC4. (ST-käsikirja 40 2017, 57, 95.) Vanhemmissa järjestelmissä on yleisesti käytetty MC3-tyyppisiä pikaliittimiä. Liitintyyppissä esitetty lukuarvo ilmoittaa kontaktipinnan halkaisijan millimetreinä.

Johdin- ja merkintäväreinä suositellaan käytettävän positiivisessa (+) johtimessa punaista, negatiivisessa (-) johtimessa valkoista sekä mahdollisessa toiminnallisessa (FE) potentiaalintasausjohtimessa vaaleanpunaista. Katoille asennettavien kaapelointien mekaaniseen suojaukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska katoilla käydään suorittamassa myös monia aurinkosähköjärjestelmiin liittymättömiä huoltotoimenpiteitä. Tämän lisäksi katoilla on talvisin lunta ja jäätä. Tasasähköosan kaapeleita ei saa asentaa suoraan katon pinnalle. Johdinsilmukat sekä paneeliketjujen kaapelointien silmukat tulisi pitää mahdollisimman pienenä salamoiden indusoimien jännitteiden pienentämiseksi. Järjestelmän tasasähkö- sekä potentiaalintasakaapeloinnit tulisi asentaa rinnakkain. Rinnakkaisten paneeliketjujen kaapelointien tulee olla yhtä pitkiä sekä samalla poikkipinta-alalla toteutettuja. (ST-käsikirja 40 2017, 96.)

Vaihtosähköosan kaapeloinnilla tarkoitetaan invertterin vaihtosähköliittimien ja muun sähkölaitteiston liitoskohdan välistä kaapelointia. Mikäli invertteri asennetaan ulkotiloihin, tulee ympäristön olosuhteiden vaikutukset, kuten UV-säteily, huomioida myös vaihtosähköosan kaapelivalinnoissa. Vaihtosähköosan syöttökaapelina suositellaan käytettävän konsentrisella johtimella varustettua kaapelia sähkömagneettisen häiriösuojauksen toteutumisen varmistamiseksi. Tällöin järjestelmän kojeiden läpiviennit tulee tehdä EMC-vedonpoistoholkeilla. (ST-käsikirja 40 2017, 97.)

3.3 Suojausmenetelmät

3.3.1 Suojaus sähköiskulta

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosassa on käytettävä sähköiskulta suojautumiseen joko pienoisjännitettä, kaksoiseristystä tai vahvistettua eristystä. Pienoisjännitettä voidaan käyttää suojausmenetelmänä vain, jos tasasähköosan avoimen piirin suurin tyhjäkäyntijännite $V_{OC\ MAX}$ on enintään 120 volttia tasajännitettä. (SFS 6000-7-712 2017, 10.)

Pienoisjännitteen hyödyntämisen jänniteraja ylittyy usein jo muutaman paneelin järjestelmässä, jolloin suojausmenetelmäksi valikoituu tyypillisesti kaksoiseristys tai vahvistettu eristys. Kaksoiseristyksessä tasasähköosassa käytettävien sähkölaitteiden ja johtojärjestelmän on oltava rakenteeltaan luokkaa II tai niillä on oltava vastaava eristys. (SFS 6000-7-712 2017, 10.)

3.3.2 Suojaus eristysvivoilta

Tasasähköosan eristystä on valvottava koko järjestelmän elinkaaren ajan. Laitteistoon on toteutettava keino, jolla mitataan paneeliston ja maadoituksen välinen eristysresistanssi vähintään kerran vuorokaudessa. Eristystä voidaan valvoa esimerkiksi standardin IEC 61557-2 mukaisella eristysmittauslaitteella tai standardin IEC 61557-8 mukaisella eristystilan valvontalaitteella. Valvontatoiminto on

yleisesti integroituna standardin IEC 62109-2 mukaan valmistetuissa invertte-reissä. Eristysvian havaitsemisen kynnyksarvot vaihtelevat järjestelmän nimellis-tehon mukaan. Esimerkiksi alle 20 kW:n järjestelmässä eristysvian havaitsemi-sen pienin sallittu kynnyksarvo on 30 k Ω . (IEC 62548 2016, 27–29.)

Eristystilan valvonnan ohella järjestelmän on ilmoitettava maadoitusviasta. Stan-dardin IEC 62109-2 mukaan valmistetun invertterin tulee ilmoittaa maadoitus-viasta paikallisesti sekä lähettää vikailmoitus eteenpäin. Vikatilanteessa käytet-tävät suojausmenetelmät riippuvat tasasähköosan virtapiirien suhteesta maadoi-tukseen. Menetelmät vaihtelevat erotettujen, kelluvien sekä toiminnallisesti maa-doitettujen paneelitojen kesken. Esimerkiksi yleisesti käytetyissä erottamatto-missa paneelitoissa voidaan eristysvikatilanteessa sammuttaa invertteri ja erot-taa koko paneelito tai erottaa paneeliston viallinen osa ja jatkaa ehyen panee-liston toimintaa normaalisti. Eristysvikojen suojausmenetelmiä on esitetty tarkem-min esimerkiksi standardissa IEC 62548. (IEC 62548 2016, 28, 31.)

3.3.3 Ylivirtasuojaus

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosan ylivirtasuojauksella tarkoitetaan käy-tännössä itse paneeliston suojaamista ylivirran vaikutuksilta. Vaikka aurinkosäh-köpaneelit ovat virtarajoitettuja lähteitä, niihin voi vikatilanteessa kohdistua ylivir-rasta johtuvia rasituksia muun muassa läheisten rinnankytkettyjen paneeliketju-jen tuottamasta takavirrasta, invertteristä tai ulkoisista virtalähteistä, kuten akus-toista. Yleisesti ottaen paneeliketjussa on oltava ylivirtasuojaus, mikäli rinnak-kaisten paneeliketjujen tuottaman takavirran arvo on suurempi kuin tarkastelta-van paneeliketjun suurin sallittu virran arvo. (IEC 62548 2016, 31–32.) Paneeli-ke-tjun suurimman sallitun virran arvon määrittää yleisesti paneelivalmistaja.

Vikavirtojen suuruudet ovat riippuvaisia paneeliketjujen lukumäärästä, vian sijain-nista sekä säteilytasosta. Aurinkosähkökennot voivat käyttäytyä pieni-impedans-sisissa vikatilanteissa virtalähteen lailla, jolloin vikavirrat eivät välttämättä ole nor-maaleja kuormavirtoja suurempia oikosulkuilanteissakaan. Tämän vuoksi pa-neelitojen oikosulkujen havaitseminen voi olla vaikeaa verrattuna perinteisten

sähköasennusten vikatilanteisiin. Paneelistoissa voi myös esiintyä valokaaria, joita ylivirtasuojalaite ei havaitse. (IEC 62548 2016, 23.)

Ylivirtasuojauksia ei vaadita, mikäli seuraavat ehdot täyttyvät: Invertterin kuhunkin itsenäiseen MPPT-säätimen on kytketty 1-2 paneeliketjua, virran kulku säätimien välillä on estetty sekä paneeliketjun kaapeloinnin jatkuvan kuormitettavuuden arvo on suurempi kuin paneeliketjun suurimman oikosulkuvirran arvo. Näin ollen ylivirtasuojia ei yleensä tarvita pienissä järjestelmissä, joissa yhteen MPPT-säätimeen on asennettu korkeintaan kaksi paneeliketjua, tai suuremmissa järjestelmissä, joissa vaihtosuuntaajat on varustettu useilla itsenäisillä MPPT-säätimillä. (ST-käsikirja 40 2017, 93–94.) Mikäli edellä esitetyt ehdot eivät täyty, ja tasasähköosan ylivirtasuojaus vaaditaan, jokaisen paneeliketjun molemmat navat on poikkeuksetta suojattava itsenäisellä suojalaitteella (SFS 6000-7-712 2017, 11–12).

Rinnakkain kytkettävien paneeliketjujen paneelien tulee olla keskenään samaa teknologiaa ja komponenttien ominaisuuksien on sovittava yhteen valmistajan suositusten mukaan. Rinnan kytkettävät aurinkosähköpaneelistot tulee suunnitella siten, että paneelistojen sisällä kiertävät virrat estetään. Rinnakkaisten paneeliketjujen sähkötekniisten ominaisuuksien, mukaan lukien oikosulkuvirran, avoimen piirin jännitteen, lämpötilakertoimen sekä STC-olosuhteiden maksimitulon, tulee olla samat. Rinnakkain kytkettyjen paneeliketjujen avointen piirien jännite-eron on oltava alle 5 %. Erisuuruiset jännitteet muodostavat paneelistöön kiertävän virran, mikä saattaa sarjapiirin katketessa muodostaa vaaratilanteen tasasähköosan erottimen ollessa auki. (IEC 62548 2016, 22.)

Ylivirtasuojaus tulee toteuttaa standardin SFS 6000-7-712 vaatimusten mukaan (ST-käsikirja 40 2017, 94). Rinnankytkettyjen paneeliketjujen ylivirtasuojauksen mitoitus ohjaa kolme epäyhtälöehtoa. Ensimmäisenä ehtona, ylivirtasuojalaitteen mitoitusvirran tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin varmuuskertoimen arvolla 1,1 korotetun paneeliketjun suurimman oikosulkuvirran arvon sekä pienempi tai yhtä suurin kuin paneeliketjun suurimman sallitun virran arvon. Tällä pyritään välttämään suojalaitteen virhetoiminnot normaaleissa toimintaolosuhteissa. (SFS 6000-7-712 2017, 11.)

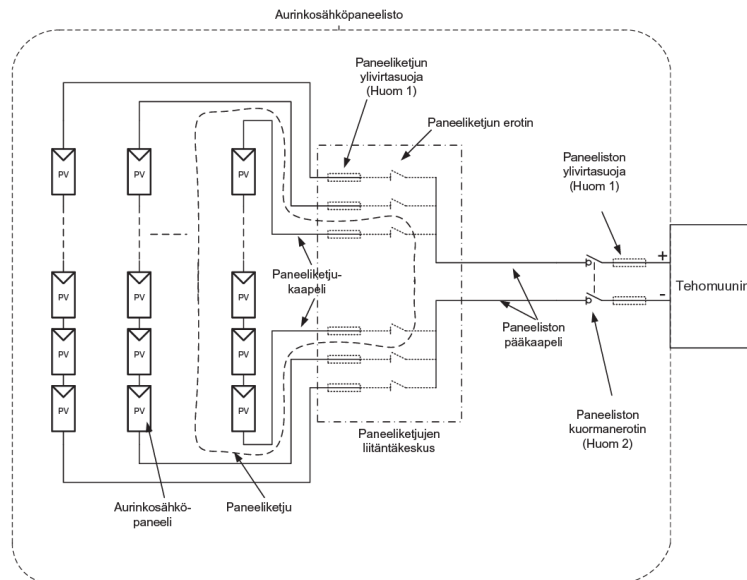
Toisena ehtona, jokainen rinnakkain kytketty paneeliketju tulee suojata siten, että rinnakkaisten paneeliketjujen tuottaman takavirran arvo on pienempi, kuin suojattavan paneeliketjun suurin sallittu virta korotettuna arvolla 1,35. Tällä pyritään välttämään rinnakkaisten paneeliketjujen tuottamien takavirtojen vaikutusta vika-tilanteessa. (SFS 6000-7-712 2017, 11.)

Kolmantena ehtona, useampia rinnankytkettyjä paneeliketjuja suojaavan yksittäisen suojalaitteen mitoitusarvon tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin varmuuskertoimen arvolla 1,1 korotetun rinnankytkettyjen paneeliketjujen suurimman summaoikosulkuvirran arvon sekä pienempi tai yhtä suuri kuin yksittäisen paneeliketjun suurimman sallitun virran arvo vähennettynä takavirtaa tuottavien paneeliketjujen suurimmalla oikosulkuvirran arvolla. Kolmas ehto johtaa yleisesti siihen, että paneeliketjujen suurimman sallitun virran arvo tulee olla moninkertainen verrattuna rinnakkaisten paneeliketjujen tuottaman takavirran arvoon. Tämä rajaa mahdollisuutta kytkeä useita paneeliketjuja rinnan vain yhteen suojalaitteeseen. (SFS 6000-7-712 2017, 11.) Tasasähköosan ylivirtasuojalaitteiden mitoitusehdot on koottu taulukkoon 1.

TAULUKKO 1. Tasasähköosan ylivirtasuojalaitteiden mitoitusehdot

Nro.	Ylivirtasuojauksen mitoitusehto
1.	$1,1 \cdot I_{SC \text{ MAX PANEELIKETJU}} \leq I_n \leq I_{MOD \text{ MAX OCPR}}$
2.	$1,35 \cdot I_{MOD \text{ MAX OCPR}} < (N_S - 1) \cdot I_{SC \text{ MAX}}$
3.	$N_p \cdot 1,1 \cdot I_{SC \text{ MAX}} \leq I_n \leq I_{MOD \text{ MAX OCPR}} - ((N_p - 1) \cdot I_{SC \text{ MAX}})$

Taulukossa 1 $I_{SC \text{ MAX PANEELIKETJU}}$ on yksittäisen paneeliketjun suurimman oikosulkuvirran arvo, I_n on suojalaitteen mitoitusvirran arvo, $I_{MOD \text{ MAX OCPR}}$ on yksittäisen paneeliketjun suurimman sallitun virran arvo, N_S on paneeliketjujen lukumäärä, $I_{SC \text{ MAX}}$ on paneeliketjujen suurimman oikosulkuvirran arvo sekä N_P on samaan ylivirtasuojalaitteeseen rinnankytkettyjen paneeliketjujen lukumäärä (SFS 6000-7-712 2017, 11). Ylivirtasuojauksen järjestelmärakennetta on havainnollistettu kuvassa 16.



KUVA 16. Ylivirtasuojauksen järjestelmärakenne (IEC 62548 2016, 17)

Kuvassa esitettyssä järjestelmässä paneeliketjut on kytketty erilliseen paneeliketjujen liitäntäkeskukseen, jossa rinnankytketyt paneeliketjut on suojattu ketjukohvaisilla ylivirtasuojilla. Vastaavasti liitäntäkeskuksen ja invertterin välinen kaapelointi on suojattu omilla ylivirtasuojilla.

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosassa on tarvittaessa käytettävä ylivirtasuojalaitteina tasasähkökäyttöön hyväksytyjä gPV-varokkeita, varokekytkinyhdistelmää tai katkaisijaa. Käytettäessä gPV-varokkeita, suojalaitteiden tulee täyttää standardin SFS-EN 60269-6 vaatimukset. Vastaavasti varokekytkinyhdistelmien tulee täyttää standardin SFS-EN 60947-3 vaatimukset ja katkaisijoiden standardien SFS-EN 60947-2 tai SFS-EN 60898-2 vaatimukset. (SFS 6000 7-712 2017, 17.)

Lisäksi tasasähköosassa käytettävien ylivirtasuojalaitteiden tulee täyttää seuraavat vaatimukset: Mitoituskäyttöjännitteen V_e tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin paneeliston suurin tyhjäkäyntijännite $V_{OC\ MAX}$, mitoitusvirran I_n tulee olla edellä esitettyjen kolmen ehdon mukainen, mitoituskatkaisukykyyn tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin paneeliston suurimman oikosulkuvirran $I_{SC\ MAX}$ arvon sekä ylivirtasuojalaitteiden tulee toimia kaksisuuntaisesti. (SFS 6000 7-712 2017, 18.)

Ylivirtasuojalaitteet tulee sijoittaa siten, että ne ovat helposti saavutettavissa. Paneeliketjun ylivirtasuojalaitteet on asennettava kohtaan, jossa ne yhdistyvät muiden ketjujen kaapelointeihin, kuten liitäntäkeskukseen, tai kohtaan, jossa ne liittyvät invertteriin. (IEC 62548 2016, 35.) Mikäli suojalaitteita sijoitetaan paneeliston luokse, tulee kiinnittää huomiota riittävään lämmönkestoisuuteen. Akkuja sisältävissä laitteistoissa tulee myös huomioida suojalaitteiden riittävä oikosulkukestoisuus. Suurien akustojen oikosulkuvirta voi olla useita kiloampeereja, mikä tulee huomioida suojalaitteita valittaessa. (ST-käsikirja 40 2017, 93.)

Vaihtosähköosan kaapelointi on suojattava ylivirran vaikutuksilta siten, että piirin johtimissa esiintyvä ylivirta katkaistaan ennen kuin ylivirran aiheuttamat termiset tai mekaaniset ilmiöt voivat aiheuttaa vaaraa (SFS 6000-4-43 2017, 6). Vaihtosähköosan syöttökaapeli on oikosulkusuojattava muun sähkölaitteiston liitospohdassa (SFS 6000-7-712 2017, 13). Oikosulkusuojauksen tarkoituksena on katkaista missä tahansa piirin osassa esiintyvät oikosulkuvirrat ennen kuin piirin johtimet saavuttavat suurimman sallitun rajalämpötilan. Standardissa SFS 6000-4-43 on esitetty suojalaitteiden toimintaominaisuuksien vaatimukset. (SFS 6000-4-43 2017, 8, 12.)

Verkkoon kytketyissä järjestelmissä ei yleisesti vaadita vikavirtasuojauksia. Syötävä verkko on tyypillisesti riittävän vahva takaamaan henkilösuojauksen vaatiman automaattisen poiskytkennän toteutumisen ylivirtasuojilla. (ST-käsikirja 40 2021, 127.) Vaihtosähköpiiriä ei vaadita suojattavaksi vikavirtasuojalla, mikäli jokin seuraavista ehdoista täyttyy: Invertteri on valmistettu standardin SFS-EN 62109-1 vaatimusten mukaan, invertterin vaihto- ja tasasähköosan välille on toteutettu vähintään yksinkertainen erotus tai aurinkosähkölaitteisto saa aikaan muuntajan erillisten käämien avulla vähintään yksinkertaisen erotuksen vikavirtasuojalaitteen ja invertterin välille (SFS 6000 7-712 2017, 17). Kaupalliset invertterit on tyypillisesti valmistettu standardin SFS-EN 62109-1 vaatimusten mukaisesti, jolloin aurinkosähkölaitteiston vaihtosähköosa ei ole tarpeen suojata vikavirtasuojalla.

Mikäli aurinkosähkölaitteiston vaihtosähköosa kuitenkin suojataan vikavirtasuojilla, tulee käytettävien suojalaitteiden olla tasajännitekäyttöön soveltuvia B-tyypin

vikavirtasuojia, joiden tulee täyttää standardien SFS-EN 62423 tai 60947-2 vaatimukset. Vikavirtasuojien hyödyntäminen voi tulla kyseeseen esimerkiksi soveltumattomissa laitteistokokoonpanoissa tai käytettäessä vikavirtasuojia vika- tai palosuojauksessa. Myös vika- ja palosuojaustarkoituksessa käytettävien vikavirtasuojien tulee olla tasajännitekäyttöön soveltuvia B-tyyppin suojalaitteita ja täytettävä edellä esitettyjen standardien vaatimukset (SFS 6000 7-712 2017, 17).

3.3.4 Ylikuormitussuojaus

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosan ylikuormitussuojauksella tarkoitetaan käytännössä paneeliston kaapelointien suojausta ylikuormituksen vaikutuksilta. Ylikuormitussuojauksen mitoitus perustuu kaapelien kuormitettavuuteen. Kaapelointien tulee kestää pahimman tapauksen virta mistä tahansa paneeliston osasta lähimmän suojalaitteen läpi sekä pahimman tapauksen virta läheisistä paneeliketjuista. (IEC 62548 2016, 42.)

Paneeliketjukaapelien ylikuormitussuojauksen mitoitusperiaatteet vaihtelevat järjestelmäkokoonpanojen kesken. Yhden tai kahden rinnankytketyn paneeliketjun järjestelmissä, joissa ylivirtasuojauksia ei vaadita tai käytetä, kaapelointien jatkuvan kuormitettavuuden tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin paneeliketjun suurin oikosulkuvirta. (SFS 6000-7-712 2017, 12.)

Useamman kuin kahden rinnankytketyn paneeliketjun järjestelmissä, joissa käytetään ylivirtasuojia, kaapelointien jatkuvan kuormitettavuuden tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin paneeliketjun suojalaitteen mitoitusvirta. Mikäli paneeliketjujen suurin sallittu virta mahdollistaa, että ylivirtasuojia ei käytetä, kaapelointien jatkuvan kuormitettavuuden tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin rinnakkaisien paneeliketjujen tuottama vastakkaissuuntainen virta. (SFS 6000-7-712 2017, 12.) Paneeliketjukaapelien jatkuvan kuormitettavuuden pienimpien mitoitusvirtojen arvot eri järjestelmäkokoonpanoilla on koottu taulukkoon 2.

TAULUKKO 2. Paneeliketjukaapelien jatkuvan kuormitettavuuden pienimmät mitoitusarvot eri järjestelmäkoko-panoilla

Suojaus	Kokoonpano	Pienin mitoitusvirran arvo
Ei ylivirtasuojausta	≤ 2 paneeliketjua	$I_Z \geq I_{SC\ MAX}$
	> 2 paneeliketjua	$I_Z \geq (N_S - 1) \cdot I_{SC\ MAX}$
Ylivirtasuojaus	Kaikki	$I_Z \geq I_n$

Taulukossa 2 I_Z on paneeliketjukaapelien jatkuvan kuormitettavuuden arvo, $I_{SC\ MAX}$ on paneeliketjun suurin oikosulkuvirta, N_S on rinnankytkettyjen paneeliketjujen lukumäärä sekä I_n on paneeliketjun suojalaitteen mitoitusvirta. Erikoisemmissä toteutuksissa, kuten osapaneelistöjärjestelmissä sekä mikroinverttereillä varustetuissa aurinkosähköpaneelissa, tulee kuormitettavuusperiaatteita tarkastella erikseen velvoittavien standardien vaatimusten mukaan.

Tasasähköosan kaapeloinnit on mitoittava standardin SFS 6000-5-52 vaatimusten mukaan. Aurinkosähköpaneelien alapuolella kuumudelle altistuvien kaapelien mitoituksessa on huomioitava vähintään 70 °C ympäristön lämpötila. (SFS 6000-7-712 2017, 16.) Lisäksi paneeliketjun jännitteenaleneman suositellaan pysyvän alle yhden prosentin (ST-käsikirja 40 2017, 96).

Vaihtosähköosan syöttökaapelien jatkuva kuormitettavuus tulee mitoittaa normaalisti standardin SFS 6000-5-52 vaatimusten mukaisesti (ST-käsikirja 40 2017, 94). Jatkuvan kuormitettavuuden pienimpänä mitoitusarvona käytetään vaihtosuuntaajan valmistajan ilmoittamaa suurinta vaihtovirtaa tai tämän tiedon puuttuessa järjestelmän suunnitellun mitoitusvirran arvoa kerrottuna arvolla 1,1 (SFS 6000 7-712 2017, 13).

Vaihtosähköosan kaapeloinnin ulottuessa ulkotiloihin on huomioitava erityisesti ympäristön lämpötilan vaikutus muun muassa kaapelien kuormitettavuuteen sekä eristemateriaalin valintaan. Esimerkiksi termoplastisen polyvinyylikloridieristeen (PVC) kaapelien lähtökohtaisesti suurin sallittu johtimen käyttölämpötila on 70 °C, mikä voi edellyttää katolle asennettavalta kaapelilta tarpeettoman suurta poikkipinta-alaa. Vastaavasti silloitetun polyeteenieristeen (PEX) kaapelien lähtökohtaisesti suurin sallittu johtimen käyttölämpötila on 90 °C, mikä jättää katolle asennettavalle kaapelille PVC-kaapelia suuremman kuormitettavuusmarginaalin.

(SFS 6000-5-52 2017, 14.) PEX-eristeisen kaapelin suurempi sallittu käyttölämpötila laajentaa kaapelityypin hyödynnettävyyttä aurinkosähköjärjestelmissä.

3.3.5 Suojamaadoitus ja potentiaalintasaus

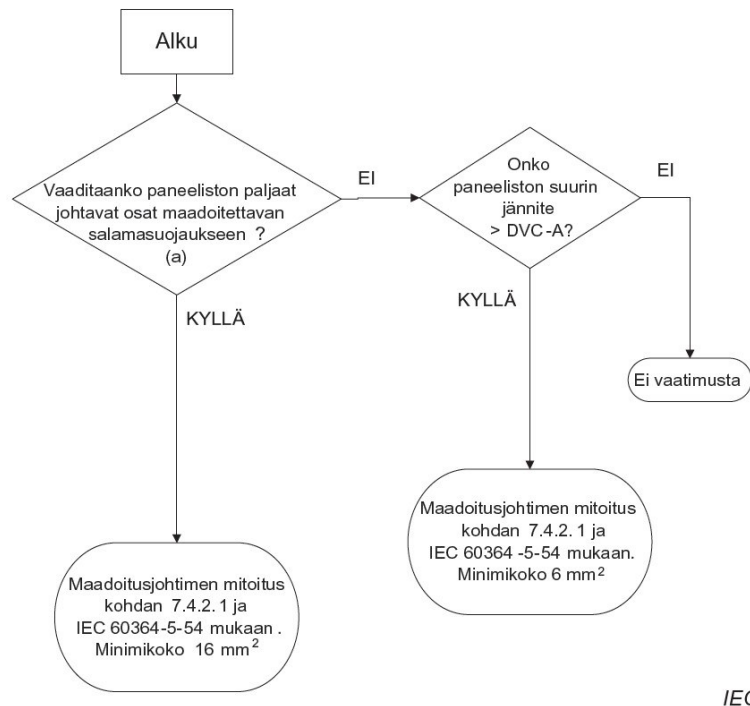
Aurinkosähköjärjestelmän invertteri sekä muiden sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat suojamaadoitetaan sähköiskulta suojautumiseksi sekä vikasuojausehtojen toteutumisen takaamiseksi. Yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytketyt on-grid -aurinkosähköjärjestelmät eivät itsessään aiheuta lisävaatimuksia maadoitus-elektrodeille. Mikäli kohteeseen on toteutettu, tai aurinkosähköjärjestelmän suojaamiseksi toteutetaan, salamasuojajärjestelmä, tulee tällöin noudattaa salamasuojajärjestelmän edellyttämiä vaatimuksia, mikä kasvattaa maadoitus-elektrodin vaatimuksia. (ST-käsikirja 40 2017, 100.)

Potentiaalintasauksella pyritään ehkäisemään mahdollisten vikatilanteiden sekä indusoituvien jännitteiden aiheuttamat riskit. Aurinkosähköpaneelien asennustelineisiin voi indusoitua jännitteitä jo lähellä olevasta ukonilmasta tai läheisistä voimakkaapeleistä. Potentiaalintasaamattomat jännitteet voivat kulkeutua muita reittejä pitkin kiinteistön sähköverkkoon, mikä voi aiheuttaa häiriötä tai laiterikkoja. Staattisten sähkönpurkausten riski aiheuttaa työturvallisuusriskin, joka voi johtaa vahinkoihin varsinkin korkealla työskenneltäessä. (ST-käsikirja 40 2017, 100.)

Asennustelineet tulee liittää potentiaalintasaukseen paneeliketjun tasajännitteen ollessa suurempi kuin 60 voltia, mikä toteutuu yleisesti jo kahden paneelin järjestelmässä (ST-käsikirja 40 2021, 136). Potentiaalintasaus toteutetaan liittämällä kaikki metalliset tukirakenteet sekä johtotiet potentiaalintasausjohtimella soveltuvaan maadoitusliittimeen tai -kiskoon. Liitostarvikkeiden valinnassa tulee kiinnittää huomiota potentiaalintasattavien rakenteiden ja potentiaalintasausjohtimien mahdollisiin materiaalieroihin, joista voi aiheutua sähkökemiallista korroosiota. (SFS 6000-7-712 2017, 21.)

Potentiaalintasausjohtimien poikkipinta-alan on oltava vähintään puolet asennuksen suurimman suojamaadoitusjohtimen poikkipinta-alasta sekä vähintään 6

mm² kuparia, 16 mm² alumiinia tai 50 mm² terästä. Pääpotentiaalintasausjohtimen poikkipinta-alan ei tarvitse olla suurempi kuin 25 mm² kuparia. (ST-käsikirja 40 2017, 100–101.) Kuvassa 17 on esitetty päätöksentekokaavio johtavien osien potentiaalintasaustarpeen määrittämiseen.



KUVA 17. Potentiaalintasaustarpeen määrittämisen päätöksentekokaavio (IEC 62548 2016, 49)

Kuvassa esitetään potentiaalintasauksen tarpeen määrittämisen vaiheet. Yleisesti ottaen aurinkosähköjärjestelmän potentiaalintasauksen tarpeeseen sekä johtimien poikkipinta-alan suuruuteen vaikuttavat mahdollisen salamansuojajärjestelmän asettamat vaatimukset sekä paneeliston suurin jännite.

3.3.6 Ylijännite- ja salamansuojaus

Ylijännitesuojauksen tarpeellisuuden määrittämiseksi tulee tehdä standardin SFS 6000-7-712 mukainen riskienarviointi. Tiivistetysti, edellä esitetyn standardin riskienarvioinnin perusteella Suomen keskimääräisellä salamaniskutiheyden arvolla määritettynä ylijännitesuojat tulee asentaa asuincohteeseen, jossa pisin suojaamaton paneeliketjukaapelointi on yli 302 metriä pitkä tai muuhun kuin asuincohteeseen, jossa pisin suojaamaton paneeliketjukaapelointi on yli 526

metriä pitkä. Paneeliketjukaapeloinnin katsotaan olevan suojattu, jos se on asennettu metalliseen rakenteeseen, kuten suojaputkeen, tai maahan. (ST-käsikirja 40 2021, 139, 141.)

Lisäksi aurinkosähköjärjestelmään tulee asentaa ylijännitesuojaus, jos kohteen sähköliittymään on toteutettu standardin SFS 6000-4-44 kohdan 443 vaatimusten mukainen ylijännitesuojaus. Toisin sanoen, mikäli kohde, johon aurinkosähköjärjestelmä asennetaan, on ylijännitesuojattu, tulee myös aurinkosähköjärjestelmä ylijännitesuojata. Vaatimus koskee erityisesti vuodesta 2017 lähtien rakennettuja asuinrakennuksia maaseudulla. Aiheesta on kerrottu enemmän esimerkiksi ST-käsikirja 40:n toisessa uudistetussa painoksessa. (ST-käsikirja 40 2021, 139–140.)

Vaikka edellä esitettyjen ehtojen perusteella aurinkosähköjärjestelmän ylijännitesuojaus ei olisikaan pakollista, ylijännitesuojat voivat kuitenkin olla vaihtosuuntaajan kannalta hyödyllinen lisäsuoja ilmastollisia ylijännitteitä vastaan (ST-käsikirja 40 2017, 101). Ylijännitesuojaus voi myös olla valmiiksi integroituna invertteriin (SFS 6000-7-712 2017, 18). Tasasähköosassa käytettävien ylijännitesuojien tulee täyttää standardien EN 50539-11 tai EN 61643-31 vaatimukset. Vastaavasti vaihtosähköosassa käytettävien ylijännitesuojien tulee täyttää standardin SFS-EN 61643-11 vaatimukset. (ST-käsikirja 40 2021, 142.)

Aurinkosähköjärjestelmät eivät itsessään vaadi erillistä salamasuojausjärjestelmää. Salamasuojaus vaaditaan kuitenkin yleensä erityisiin kohteisiin, joita ovat muun muassa kulttuurihistoriallisesti tärkeät rakennukset, kuten kirkot, sekä ympäristölle potentiaalisesti vaaraa aiheuttavat kohteet, kuten räjähdysvaaralliset tilat. Salamasuojaus voi myös tulla kyseeseen suurissa investoinneissa, joissa pyritään suojaamaan arvokkaat laitteistot. (ST-käsikirja 40 2017, 102–103.)

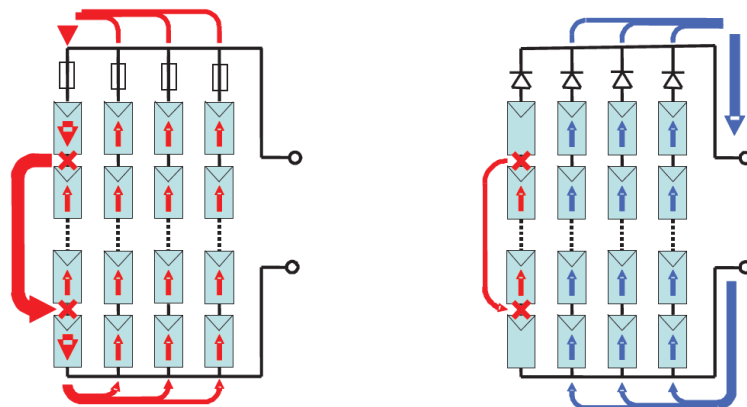
Mikäli kohteeseen on jo asennettu salamasuojausjärjestelmä, tulee aurinkosähköjärjestelmä liittää salamasuojausjärjestelmään standardin SFS-EN 62305-3 vaatimusten mukaisesti (IEC 62548 2016, 36). Asennettaessa aurinkosähköjärjestelmä salamasuojausjärjestelmän suojaamaan tilaan, tulee järjestelmän kaikki kaapeloinnit erottaa kaikista salamasuojausjärjestelmän osista riittävällä ero-

tusetäisyydellä. Mikäli riittävää erotusetäisyyttä ei voida saavuttaa, tulee aurinkosähköjärjestelmä kytkeä salamasuojajärjestelmän potentiaalintasaukseen standardissa SFS-EN 62305-3 esitellyllä tavalla.

3.3.7 Estodiodit

Aurinkosähköpaneeliston normaalisti toimivien osien virrat kulkeutuvat tyypillisesti vikatilanteessa paneeliston vialliseen osaan. Vikavirtojen suunta on normaalin toimintaan verrattuna vastakkainen, minkä vuoksi näistä virroista käytetään nimitystä takavirta. Takavirtojen kulkeutuminen vikapisteeseen voidaan pysäyttää, tai virtoja vähintäänkin pienentää, oikein mitoitetujen ja toimivien estodiodien avulla. Estodiodien käyttö on yleensä hyödyllistä kaikissa järjestelmissä, riippumatta paneeliston maadoitustavasta tai vaihtosuuntaajan rakenteesta. (IEC 62548 2016, 59.)

Rinnakkaisiin paneeliketjuihin tulee aina asentaa ylivirtasuojat vastakkaisuuntaisten takavirtojen pysäyttämiseksi. Ylivirtasuojien toimimiseksi takavirran arvon tulee kuitenkin olla suurempi kuin suojalaitteen toimintavirta, mikä ei aina toteudu heikoissa säteilyolosuhteissa. Tällöin estodiodi toimii ylivirtasuojia tehokkaampana suojana. (IEC 62548 2016, 59.) Joissakin maissa on sallittua korvata ylivirtasuojalaitteet estodiodeilla, mutta Suomessa ei ole sallittua käyttää estodiodeja ylivirtasuojaukseen (SFS 6000-7-712 2017, 12). Estodiodien toimintaperiaate on esitetty kuvassa 18.



KUVA 18. Estodiodien toimintaperiaate (IEC 62548 2016, 60)

Kuvassa esitetyissä paneeliketjuissa aiheutuu oikosulku. Vasemmalla esitetyssä järjestelmässä ei ole estodiodeja, jolloin viallisten paneelien kautta kulkeutuu paneeliketjun normaalin toimintavirran lisäksi muista paneeliketjuista peräisin oleva vastakkaisuuntainen vikavirta. Oikealla esitetyssä järjestelmässä vastakkaisuuntaisen vikavirran kulku on estetty estodiodeilla.

Estodiodien mitoitusjännitteen on oltava vähintään kaksinkertainen paneeliston suurimpaan jännitteeseen nähden sekä mitoitusvirran on oltava vähintään 1,4-kertainen suojattavan virtapiirin STC-olosuhteiden oikosulkuvirtaan nähden. Lisäksi estodiodit on suojattava ympäristön rasitusten vaikutuksilta sekä asennettava niin, että paljaat jännitteiset osat peitetään. Estodiodien myötäsuuntaisen johtavan tilan jännitehäviö voi olla yli yhden voltin, minkä vuoksi diodien riittävästä lämmön johtumisesta on huolehdittava esimerkiksi jäähdytyslevyjen avulla. (IEC 62548 2016, 46, 62.)

3.3.8 Sähkökeskukset

Yleiseen sähkönjakeluverkkoon kytkettyjen järjestelmien yhteydessä tarkasteltavan kohteen sisäiseen sähköverkkoon syötetään tehoa kahdesta suunnasta. Toteutustavasta riippuen aurinkosähköjärjestelmä voi vaarantaa vaihtosähköosan liitäntäpisteen ylikuormitussuojauksen luotettavan toteutumisen. Liitäntäpisteen ylikuormittuminen voi aiheuttaa pahimmillaan paloriskin. (ST-käsikirja 40 2021, 121.)

Liitäntäpisteen kuormitettavuuteen tulee kiinnittää huomiota erityisesti nimellisvirraltaan pienissä sähkökeskuksissa. Ylikuormitustilanne voi aiheutua esimerkiksi tilanteessa, jossa kiinteistön sähköliittymän pääsulakkeet ovat kokoa 3 x 25 A ja lisäksi keskus, johon aurinkosähköjärjestelmä liitetään, on nimellisvirraltaan 25 A. Tällöin keskukseen syötetään tehoa sekä jakeluverkon suunnasta että aurinkosähköjärjestelmän suunnasta, jolloin keskusta on mahdollista ylikuormittaa ilman, että mikään suojalaite havaitsee ylikuormaa. (ST-käsikirja 40 2021, 121.)

Edellä kuvatun kaltaisissa tilanteissa tulee aina varmistua liitäntäpisteen ylikuormitussuojauksen toteutumisesta. Suojauksen toteuttamiseksi on monia ratkaisuja, kuten ylikuormituksen estävien ohjauksien toteuttaminen, keskuksen virrankestoisuuden kasvattaminen tai ylikuormituksen estävien suojalaitteiden lisääminen. Ratkaisukeinoja on esitetty enemmän esimerkiksi ST-käsikirjassa 40. (ST-käsikirja 40 2021, 122.)

Ylikuormitussuojauksen toteutumisen ohella on syytä tarkastella myös vaihtosähköosan suojalaitteiden oikosulkukestoisuutta, erityisesti suurien järjestelmien yhteydessä. Aurinkosähköjärjestelmien aiheuttama oikosulkuvirta ei tyypillisesti vaikuta merkittävästi kiinteistön sisäverkon mitoitukseen, mutta esimerkiksi yli 50 kVA:n järjestelmissä on syytä tarkastaa oikosulkuvirtamitoitusta varsinkin rajatapauksissa. (ST-käsikirja 40 2021, 125.)

Invertterit tuottavat tyypillisesti 1,2 – 1,5-kertaisen oikosulkuvirtasäyksen suhteessa nimellisvirtaansa ennen sammumistaan. Tällöin 100 kVA:n invertteri voisi tuottaa tehollisarvoltaan 250 – 300 ampeerin oikosulkuvirran, millä voisi rajatapauksissa olla merkitystä esimerkiksi 6 kA:n johdonsuojakatkaisijoiden kestävyyskannalta. Inverttereillä on suurempi merkitys dynaamisen oikosulkuvirran vaikutusten kannalta. Edellä esitetyn 100 kVA:n invertterin oikosulkuvirran huippuarvo voi olla 400 – 700 ampeeria, mikä on merkittävä lisäys esimerkiksi sähkökeskusten mitoituksen kannalta. (ST-käsikirja 40 2021, 125.)

3.4 Suorituskyvyn optimointi

Aurinkosähköjärjestelmien energiantuottokykyyn keskeisimmin vaikuttavia tekijöitä ovat paneelien pintaan kohdistuvat varjostukset, paneelien kallistuskulma ja suuntaus sekä ympäristön lämpötila (ST-käsikirja 40 2017, 18–19). Lisäksi järjestelmien suorituskykyyn vaikuttaa johtimissa aiheutuva jännitteenalenema, paneelien pinnan likaantuminen, paneelien suoritusarvojen eroista johtuvat häviöt sekä paneelien huonontuminen (IEC 62548 2016, 24). Eri tekijöiden vaikutuksia tulee arvioida yhdessä asennuskohteen ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi

toisinaan aurinkosähköpaneelien näennäisesti heikommalla suuntauksella voidaan kuitenkin saavuttaa parempi sähköenergian vuosituotanto, mikäli tällä voidaan välttää esimerkiksi varjostumia. (ST-käsikirja 40 2017, 19.)

3.4.1 Varjostukset

Aurinkosähköpaneelit ovat aina herkkiä varjostusten aiheuttamille tehohäviöille paneelityypistä riippumatta. Erityisen herkkiä varjoille ovat kiteisestä piistä valmistetut aurinkosähköpaneelit. Paneelit ovat erityisen herkkiä lyhyen sivun suuntaisille varjoille. Mikäli yksikin lyhyen sivun suuntainen kennorivi varjostuu, koko paneelin tehontuotto keskeytyy. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.) Pahimmillaan usean paneelin jäädessä varjoon koko paneeliketjun jännite voi laskea niin alas, että järjestelmän säätö ei kykene toimimaan, jolloin koko paneeliketjun energiantuotanto keskeytyy (ST-käsikirja 40 2017, 20). Paneelien sijoituksessa tuleekin aina ottaa huomioon varjostavat elementit.

Kattoasenteisissa järjestelmissä tyypillisiä varjojen aiheuttajia ovat muun muassa savupiiput, huippumurit, viemärin tuuletukset, kattovarusteet, ilmanvaihtokanavat, jäähdytyskoneet ja muut talotekniset järjestelmät sekä liian lähelle asennetut toiset paneelirivit (RT-ohjekortti 103076 2019, 6). Esimerkiksi pientaloissa yleisen huippumurin tuottama varjostus voi heikentää vuosituotantoa jopa 10 % (ST-käsikirja 40 2017, 23). Rakennusten ulkopuolisia varjostavia elementtejä ovat esimerkiksi kasvillisuus, puut ja naapurirakennukset. Uudiskohteita suunnitellessa tulisi pyrkiä sijoittamaan asennusta vaikeuttavat ja varjostuksia aiheuttavat elementit aurinkosähköjärjestelmälle suotuisesti, kuten katon pohjoispuolen lappeelle. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.)

3.4.2 Suuntaus ja kallistus

Aurinkosähköpaneelien suuntauksella sekä kallistuksella on merkittävä vaikutus energian vuosituotantoon. Suomessa paneelit pyritään suuntaamaan suoraan etelään, jolloin mahdollistetaan suurin sähköenergian vuosituotanto. Noin $\pm 15^\circ$

poikkeamat suuntaukseen eivät juurikaan vaikuta energian vuosituotantoon, joskin paneelien täydellinen suuntaaminen länteen tai itään vähentää vuosituotantoa jo merkittävästi. Aurinkosähköpaneelien suuntauksella voidaan halutessa vaikuttaa energiatuotannon jakautumiseen vuorokauden aikojen kesken. Paneelien suuntaaminen länteen tai itään voi olla perusteltua, mikäli kohteen sähkönkulutus painottuu merkittävästi esimerkiksi aamu- tai iltapäivään. (Motiva 2020c.)

Aurinkosähköpaneelien energiatehokkain kallistuskulma Suomessa on noin 35° ja 45° välillä. Paneelien vuosituotanto pysyy lähes optimikallistuskulman tasolla aina kallistuskulmiin 30° ja 60° asti, joita pienemmillä tai suuremmilla arvoilla tuotetun vuosien energian määrä alkaa vähetä merkittävästi. Ohjeena voidaan pitää, että $\pm 15^\circ$ poikkeama optimikallistuskulmaan vähentää sähköenergian vuosituotantoa noin 5 %. (Motiva 2020c.)

Vuosituotannon kannalta optimaalisen kallistuskulman arvo vaihtelee Suomessa paikkakuntien kesken. Pohjoisemmassa suurempi kallistuskulma on vuosituotannon kannalta parempi kuin etelässä. Helsingissä voidaan tuottaa vuodessa nimellisteholtaan 1 kW:n aurinkosähköjärjestelmällä 40° optimikallistuskulmaan asennettuna 872 kWh sähköenergiaa. Vastaavat tunnusluvut ovat Jyväskylässä 42° kallistuskulma ja 821 kWh vuosituotettua sähköenergiaa sekä Rovaniemellä 47° kallistuskulma ja 802 kWh vuosituotettua sähköenergiaa. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.)

Aurinkosähköpaneelien kallistuskulmaa muuttamalla voidaan myös vaikuttaa energiantuotannon jakautumiseen vuodenaikojen kesken. Pienemmällä kallistuskulman arvolla voidaan tehostaa aurinkosähkön tuotantoa keskikesällä ja vastaavasti suuremmalla kallistuskulman arvolla voidaan optimoida aurinkosähkön tuotanto keväisin ja syksyisin. Mikäli aurinkosähköjärjestelmän tuottama energia pystytään hyödyntämään kokonaisuudessaan kiinteistön sisäverkossa, on suositeltavaa käyttää kallistuskulman arvona vuosituotannon kannalta optimaalista kallistuskulmaa. (Motiva 2020c.)

3.4.3 Lämpötila

Aurinkosähköpaneelit tulee kiinnittää alustaansa tuulettuvasti jättämällä riittävän suuri ilmarako paneelien ja kiinnitysrakenteiden väliin. Riittämättömästi tuulettuva rakenne nostaa paneelien lämpötilaa, mikä voi johtaa varsinkin kiteisestä piistä valmistettujen paneelien hyötysuhteen merkittävään laskuun. Lämpötilan noustessa jo muutamalla asteella yli STC-olosuhteiden + 25 °C lämpötilan, paneelien tuotantokapasiteetti voi heikentyä noin prosentilla. (Motiva 2020c.)

Lämpötila voi paneelien ympäristössä nousta helposti + 70 °C:een. Pahimmillaan paneelien energiantuotantokapasiteetti voi heikentyä jopa 30 % huonosti tuulettuvissa rakenteissa. (ST-käsikirja 40 2017, 22.) Toisaalta kylmällä pakkaskelillä, paneelin tuotantokapasiteetti voi kasvaa merkittävästi. Lisäksi on hyvä huomioida, että lämpötilan vaikutus tuotantokapasiteettiin vaihtelee eri paneelityyppien kesken. Esimerkiksi lämpötilan nousu ei heikennä ohutkalvopaneelien hyötysuhdetta vastaavasti kuin piikidepaneeleissa (Motiva 2020c).

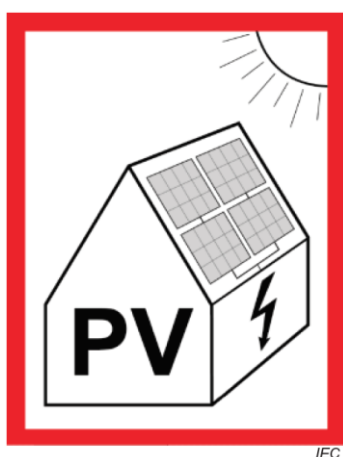
Lämpötilan hallinnan kannalta paneelien parhaana asennustapana voidaan pitää maa-asennusta, jossa ilma pääsee kiertämään vapaasti paneelien ympärillä. Tällöin paneeliston lämpötilan voidaan arvioida asettuvan suuntaa antavasti noin + 35 °C ympäristöön. Toiseksi parhaana asennustapana voidaan pitää kattoasennusta, jossa paneeliston ja katon välissä on riittävä tuuletustila. Paneeliston arvioituna lämpötilana voidaan tällöin pitää + 45 °C. Kolmanneksi parhaana asennustapana voidaan pitää, mahdollisesti yllätyksellisestikin, julkisivuasennusta niukalla tuuletustilalla, jolloin paneeliston lämpötilaksi voidaan arvioida noin + 55 °C. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.)

Lämpötilan hallinnan kannalta heikoin asennustapa on kattoon integroitu asennustapa, jossa paneeliston ja katon välissä on hyvin niukka tuuletusväli. Tällöin paneeliston lämpötila voi kohota jopa + 65 °C lämpötilaan, mikä heikentää suorituskykyä merkittävästi. Kattoon integroitujen järjestelmien yhteydessä tulee myös kiinnittää huomiota kaapelointien altistumiselle korkealle lämpötilalle. (RT-ohjekortti 103076 2019, 6.)

3.5 Merkinnät ja dokumentointi

Kunnossapidon, verkonhaltijan, pelastusalan sekä muiden toimijoiden henkilöturvallisuuden varmistamiseksi on erityisen tärkeää ilmoittaa, jos rakennuksessa on aurinkosähkölaitteisto (IEC 62548 2019, 55). Aurinkosähköjärjestelmästä varoitavat merkit on asennettava vähintään kiinteistön sähköliittymispisteeseen, sähköenergian mittauspisteeseen, mikäli se on erillään liittymispisteestä sekä pisteeseen, johon aurinkosähköjärjestelmän invertteri on kytketty (ST-käsikirja 4 2017, 93).

Varoitusmerkintöjen on oltava joko IEC-standardien tai paikallisten standardien ja määräysten mukaisia. Merkinnät tulee tehdä paikallisella kielellä tai käyttäen soveltuvia, selkeästi ymmärrettäviä varoitussymboleja. Merkintöjen tulee olla rakenteeltaan ja kiinnitystavaltaan koko laitteiston käyttöiän kestäviä, häviämättömiä sekä luettavissa vähintään 80 cm etäisyydeltä. Edellä mainittujen lisäksi tulee merkitä soveltuvasti paneelistöjen ja paneeliketjujen liitäntäkeskus sekä erotuslaitteet. Liitäntäkeskukset on varustettava tasajännitteisestä aurinkosähköstä varoittavilla merkeillä. Lisäksi erotuslaitteet tulee merkitä tunnistettavasti asennuspiirustuksia vastaavilla tunnuksilla. Mikäli on käytetty useita toisiinsa kytkemättömiä erotuslaitteita, tulee käyttää lisämerkintää, joka varoittaa rinnakkaisista tasasähkölähteistä. (IEC 62548 2019, 55.) Esimerkiksi sähkökeskuksiin soveltuva aurinkosähköjärjestelmästä varoittava merkintä on esitetty kuvassa 19.



KUVA 19. Aurinkosähköjärjestelmästä varoittava merkintä (IEC 62548 2016, 56)

On-grid -aurinkosähköjärjestelmien yhteydessä sähköturvallisuuslaki sekä SFS 6000 -standardisarja velvoittavat tarpeellisen käyttöpiirustussarjan ylläpitoon. Aurinkosähköjärjestelmästä tulisi olla käytettävissä koko laitteiston elinkaaren ajan vähintään laitteiston käyttöönottopöytäkirja, käyttöohjeet, hätäpysäytyksen ohjeet sekä johdotuskaavio. Lisäksi järjestelmän asennuksen yhteydessä tulee päivittää kiinteistön sähköjärjestelmän olemassa olevat muut koskevat piirustukset, kuten liittyttävän sähkökeskuksen pääkaavio sekä nousujohtokaavio, ajan tasalle. (ST-käsikirja 2017, 112–113.)

Järjestelmästä dokumentoitavia perustietoja ovat vähintäänkin laitteiston tekniset perustiedot, suunnittelijalta saatavat tiedot sekä asentajalta saatavat tiedot. Laitteistosta tulee dokumentoida vähintään mitoitusvahvuus, aurinkosähköpaneelien sekä invertterin valmistaja, malli ja lukumäärä, järjestelmän asennus- ja käyttöönottopäivä, asiakkaan nimi, asennuskohteen osoite sekä projektitunnus. Lisäksi tulisi dokumentoida vähintään järjestelmän suunnitelleen yrityksen yhteystiedot sekä järjestelmän asentaneen yrityksen yhteystiedot. (SFS-EN 62446-1 2016, 13.)

Johdotuskaavio on laadittava vähintään yksiviivaisella esitystavalla, ja kaavio on varustettava teknisillä tiedoilla paneelistoista ja paneeliketjuista, vaihtosähköjärjestelmästä sekä maadoitus- ja ylijännitesuojauksesta. Paneelistojen dokumentointiin on sisällytettävä tieto aurinkosähköpaneelien tyypistä, kokonaislukumäärästä sekä kokoonpanosta, liitännäisjärjestelmien ja -keskusten sijainnista, tasasähköerottimien sijainnista ja mitoitusvahvuuksista, sekä suojalaitteiden tyypistä, sijainnista ja mitoitusvahvuuksista. Paneeliketjujen dokumentoinnissa tulee esittää paneeliketjujen lukumäärä, paneelien lukumäärä per ketju, ketjujen tunnistetiedot, ketjukaapelien tyypit ja poikkipinta-alat sekä mahdollisten estodiodien tyyppi. (SFS-EN 62446-1 2016, 14–15.)

Vaihtosähköjärjestelmästä tulee esittää vaihtosähköerottimien sekä suojalaitteiden tyypit, sijainnit ja mitoitusvahvuudet sekä kaapelien tyypit ja poikkipinta-alat. Maadoitus- ja ylijännitesuojausjärjestelmien dokumentoinnin tulee sisältää yksityiskohtaiset tiedot kaikkien maadoitus- potentiaalintasausjohtimien liitännäispisteistä ja poikkipinta-aloista sekä yksityiskohtaiset tiedot kaikista ylijännitesuojista sekä liitännöistä salamasuojausjärjestelmään. (SFS-EN 62446-1 2016, 14–15.)

Käyttöpiirustusten tulee sisältää datalehdet vähintäänkin jokaisesta aurinkosähköpaneeli- ja invertterityypistä sekä paneeliston kiinnitysjärjestelmästä. Myös muiden merkittävien komponenttien datalehtien sisällyttämistä käyttöpiirustuksiin suositellaan. Järjestelmän käyttöohjeiden tulee sisältää tiedot toimenpiteistä, joilla järjestelmän oikea toiminta varmistetaan, tarkastuslista vikatilanteiden varalta sekä ohjeet kunnossapitoon ja puhdistukseen. Lisäksi tulee esittää järjestelmään sovellettavat työmenetelmät sekä ohjeet erotustoimenpiteiden ja hätäpysäytyksen suorittamiseksi, jos hätäpysäytystoiminto on toteutettu. (SFS-EN 62446-1 2016, 15.)

Edellä esitettyjen merkintä- ja dokumentointivaatimusten lisäksi useimmissa julkisissa rakennuksissa, kauppakeskuksissa, teollisuuskiinteistöissä sekä vähintään kolmen asuinhuoneiston asuinrakennuksissa edellytetään pelastussuunnitelman laatimista. Pelastussuunnitelmassa, ja siihen liittyvässä riskikartoituksessa, on huomioitava myös aurinkosähköjärjestelmät. (ST-käsikirja 40 2021, 44.)

Pelastussuunnitelmaa vaativissa kohteissa vaaditaan yleisesti myös kohdekorttien laatimista. Tällöin on yleisesti tarpeen laatia myös aurinkosähköjärjestelmistä tietokortti, jossa esitetään tiedot aurinkosähköjärjestelmän käytöstä, kunnossapitosuunnitelma, yhteystiedot sekä muu turvallisuuteen liittyvä ohjeistus. Laajoissa aurinkosähköjärjestelmissä tietokortin tärkeimmät tiedot tulisi jakaa omille sivuilleen sekä esittää tiedot tärkeysjärjestyksessä. Tietokortti tulee sijoittaa kohteen sähkötilaan, mahdolliseen paloilmoitinkeskukseen tai muulle ensisijaiselle hyökäysreitille. (ST-käsikirja 40 2021, 45.)

3.6 Käyttöönotto

Kuten kaikki sähkölaitteistot, myös aurinkosähköjärjestelmät on tarkastettava sähköturvallisuuslain mukaisesti ennen käyttöönottoa sekä luovutusta haltijalle. Tässä kappaleessa esitetyn käyttöönottotarkastuksen sisältö tulee suorittaa kaikille järjestelmille. Erityisen suurissa ja monimutkaisissa järjestelmissä voi olla tarpeen tehdä lisätestejä, joita on esitetty standardissa SFS-EN 62446-1. Käyttöönottotarkastus jakautuu paneelistopiirin ja vaihtosähköpiirin tarkastukseen.

Vaihtosähköpiirin tarkastukset rajautuvat tyypillisesti invertterin syöttökaapelin tarkastukseen. (ST-käsikirja 40 2017, 110–111.)

Käyttöönottotarkastus aloitetaan aistinvaraisella tarkastuksella, joka suoritetaan ennen kuin asennus kytketään jännitteiseksi. Aistinvaraisessa tarkastuksessa varmistetaan muun muassa yleisille vaatimuksille, sähköiskulta suojautumiselle, eristysvikojen vaikutuksilta suojautumiselle, ylivirtasuojaukselle, maadoituksille ja potentiaalintasauksille, salama- ja ylijännitesuojaukselle, sähkölaitteiden valinnalle ja asentamiselle, vaihtosähköjärjestelmälle sekä merkinnöille ja tunnistamiselle asetettujen vaatimusten täyttymisestä. Yksityiskohtaiset vaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 62446-1. (SFS-EN 62446-1 2016, 16–19.)

Käyttöönottotarkastus sisältää seuraavat mittaukset: Paneelien napaisuuden tarkastus, paneeliketjujen avoimen piirin jännite U_{OC} , paneeliketjujen virta, paneeliston eristysresistanssi sekä paneeliston potentiaalintasausten jatkuvuus. Paneelistöpiirin käyttöönottomittausten suorittamiseen tarvitaan asennustesteri sekä säteilyvoimakkuus-, lämpötila-, jännite- ja virtamittarit. Mittaukset tulisi suorittaa aurinkoisena päivänä, jolloin Auringon säteilyvoimakkuus on suurempi kuin 750 W/m^2 . Lisäksi olosuhteiden tulisi pysyä samoina mittausten ajan. (ST-käsikirja 40 2017, 111.)

Koska paneeliston käyttöönottomittaukset suoritetaan mitä todennäköisemmin eri olosuhteissa, kuin paneeliston nimellisarvot on määritetty, tulee mitatut arvot suhteuttaa nimellisarvoihin. Mittauksista odotettavissa olevat arvot saadaan määritettyä jakamalla tarkastuskohteessa mitattava hetkellinen säteilyvoimakkuuden arvo STC-olosuhteiden nimellisarvolla 1000 W/m^2 , jolla kerrotaan nimelliset avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran arvot. Lisäksi avoimen piirin jännitteen odotettavissa oleva arvo tulee korjata vastaamaan paneelien mittaushetken lämpötilaa. (ST-käsikirja 40 2021, 156.)

Avoimen piirin jännitteen mittaus kattaa myös napaisuuden tarkastuksen. Avoimen piirin jännite mitataan paneeliketjuittain, ja mitattua arvoa verrataan odotettavissa olevaan arvoon. Mitatun arvon tulisi olla 10 % tarkkuudella odotettavissa olevasta arvosta. Muutoin on syytä epäillä paneelien virheellistä kytkentää tai

muuta vikaa, joten tällaisessa tilanteessa poikkeaman syy tulee selvittää. (ST-käsikirja 40 2017, 111.)

Paneeliketjujen virta voidaan mitata joko oikosulku- ja normaalikäyttötilanteessa. Virran mittauksella pyritään varmistamaan järjestelmän odotettu toiminta sekä löytämään mahdollisia vikoja johdotuksista. Oikosulkutestiä pidetään suositeltavana, sillä se poissulkee invertterin vaikutuksen, mutta testiin liittyy riskejä. Oikosulkuvirta voidaan määrittää joko erityisellä aurinkosähkötesterillä, tai paneeliketjuun voidaan tehdä kuormakytkimellä tilapäinen oikosulku, josta virran arvo mitataan esimerkiksi soveltuvalla pihtivirtamittarilla. Paneeliketjujen virta voidaan mitata myös normaalikäyttötilanteen testillä, jossa ketjujen virrat mitataan normaalissa toimintatilassa. (SFS-EN 62446-1 2016, 24–26.)

Eristysresistanssimittauksessa mitataan paneeliketjujen positiivisen ja negatiivisen navan johtimet maapotentiaalia vasten. Mittaukset tulee aloittaa negatiivisen navan ja maadoituksen välisellä mittauksella, jota seuraa positiivisen navan ja maadoituksen välinen mittaus. (SFS-EN 62446-1 2016, 27–28.) Eristysresistanssimittauksissa käytettävät testijännitteet sekä vaaditut eristysresistanssiarvot on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Eristysresistanssimittauksen pienimmät sallitut arvot (SFS-EN 62446-1 2016, 28)

Järjestelmän nimellisjännite $V_{OC\ STC} \cdot 1,25$ (V)	Testijännite (V)	Vaadittu eristysresistanssi (MΩ)
< 120	250	0,5
120 – 500	500	1
500 – 1000	1000	1
> 1000	1500	1

Potentiaalintasausten sähköinen jatkuvuus mitataan suojamaadoitus- ja potentiaalintasausjohtimien liitännäpisteissä. Samalla tulee varmistaa kytkentöjen jatkuvuus päämaadoituskiskoon asti. (SFS-EN 62446-1 2016, 23.)

Käyttöönottotarkastuksen valmistuttua tulee laatia tarkastusraportti. Raporttiin dokumentoidaan yhteenveto järjestelmän tiedoista sekä toteutukseen osallistuneista tahoista, luettelo käyttöönotetuista virtapiireistä ja tarkastuspöytäkirja, joka sisältää testitulokset. Lisäksi määritetään mahdollisen seuraavan tarkastuksen ajankohta. Käyttöönottoraportissa tulee myös antaa suositus kunnossapitotarkastusten tiheydestä. Tarkastusraportti vahvistetaan tarkastajan tai tarkastajien allekirjoituksilla. (SFS-EN 62446-1 2016, 35.) Käyttöönottotarkastuksessa määritettyjen arvojen perusteella laaditaan yleistietolomake, jolla anotaan verkkoyhtiöltä lupa kytkeä laitteisto yleiseen sähköjakeluverkkoon.

4 KUNNOSSAPITOPERIAATTEET

4.1 Yleisimmin vikaantuvat komponentit

Sähköasennusstandardien mukaisesti toteutetut sekä ohjeiden mukaisesti käytetyt aurinkosähköjärjestelmät ovat normaalisti kestäviä sekä turvallisia. Aurinkosähköpaneelit sekä kaapelit ovat rakenteeltaan kestäviä, mutta suuret piste-mäiset kuormitukset, kuten kävely tai painavat esineet, voivat rikkoa komponentteja ja aiheuttaa sähköiskun tai tulipalon vaaran. Vaurioituneet komponentit on syytä korjauttaa, korvata tai poistaa käytöstä välittömästi valmistajan ohjeistuksen mukaan lisävaurioiden tai henkilövahinkojen estämiseksi. (Tukes 2020.)

Oikein ja suunnitellusti toimiessaan aurinkosähköjärjestelmät ovat hyvin turvallisia, eivätkä aiheuta palovaaraa. Kuitenkin pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTOon kirjattiin vuosina 2013 - 2017 yhteensä 17 tulipaloa, joissa on ollut osallisena aurinkosähköjärjestelmä. (Rasinkoski 2020, 54, 56.) Aurinkosähköjärjestelmiin liittyviä tehtäviä on ollut vuosi vuodelta enemmän ja vuonna 2018 aurinkosähköpaloja tilastoitiin jo kahdeksan kappaletta (Holopainen 2020).

Maissa, joissa aurinkosähköjärjestelmät ovat yleisiä, myös aurinkosähköjärjestelmiin liittyvät tulipalot ovat yleisempiä. Esimerkiksi Saksassa on tilastoitu 350 tulipaloa vuosina 2001 - 2012, joissa aurinkosähköjärjestelmä on ollut syytymissyynä tai osallisena paloon. Vastaavia tapauksia on tilastoitu Australiassa 400 kappaletta vuoteen 2016 mennessä sekä Italiassa jopa 2000 tapausta vuosina 2003 - 2015. (Rasinkoski 2020, 6, 8.)

Aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien palojen tilastointi sekä raportointi on kuitenkin useissa maissa varsin sattumanvaraista ja suppeaa. Lisäksi eri maissa vaikuttavat hyvinkin erilaiset ympäristöolosuhteet, markkinatilanteet, määräykset sekä vallitsevat asennustavat, minkä vuoksi lukuja tulee pitää lähinnä suuntaa antavina. Kuitenkin esimerkkimaiden aurinkosähköpaloille on yhteistä, että riskit ovat toteutuneet tyypillisesti pari vuoden kuluessa järjestelmien asennuksesta. (Rasinkoski 2020, 6, 8.)

Eurooppalaisen lähdeaineiston perusteella merkittävimmät alkusyyt aurinkosähköjärjestelmien tulipaloille ovat suunnittelu- ja asennusvirheet. Suunnittelu ja asennusvirheiden osuuden tulipaloissa on arvioitu olevan Saksassa 55 %, Englannissa 77 % ja Alankomaissa 80 %. Muissa tapauksissa palon syynä on ollut tyypillisesti viallinen tuote. Kuitenkin suuri osa paloista olisi ollut vältettävissä huolellisella suunnittelu- ja asennustyöllä sekä järjestelmien huollolla. (Rasinkoski 2020, 8.)

Aurinkosähköjärjestelmien keskeisimmiksi turvallisuusriskeiksi ovat osoittautuneet tasasähköosassa käytetyt liitostarvikkeet sekä kytkinlaitteet. Aurinkosähköjärjestelmien tyypillisimmät syttymissyynä toimivat komponentit ovat DC-liittimet, DC-kytkimet, aurinkosähköpaneelit, vaihtosuuntaajat sekä vaihtosähköasennukset. Palon juurisyynä toimiva komponentti vaihtelee vahvasti ajankohdan sekä tarkasteltavan maan tyypillisten asennustapojen kesken. (Rasinkoski 2020, 7.)

Alankomaissa palojen juurisyynä arvioidaan lähes kaikissa tapauksissa eri valmistajien yhteensopimattomat DC-liittimet. Vastaavasti maissa, joissa DC-kytkimien käyttö on pakollista, tai yleistä, kuten Australiassa, on kytkinvikojen osuus huomattavan suuri. DC-kytkimet ovat tyypillisesti väärin valittuja tai asennettuja. Myös vaihtosuuntaajat ovat olleet yleisiä palon aiheuttajia, erityisesti asennettuna palavalle alustalle. Aurinkosähköpaneelien on huomattu olevan verrattain harvinaisen syy aurinkosähköjärjestelmien tulipaloihin, huomioiden paneelien suuri määrä muihin järjestelmäkomponentteihin verrattuna. (Rasinkoski 2020, 7.)

4.2 Turvallisuutta ylläpitävät kunnossapitotehtävät

Aurinkosähköjärjestelmät ovat perusrakenteeltaan yksinkertaisia, eivätkä vaadi jatkuvaa huoltoa ja ylläpitoa. Kuitenkin aurinkosähköpaneelien sekä kiinnitysjärjestelmien suunniteltu käyttöikä on jopa 30 vuotta, minkä vuoksi järjestelmät on syytä tarkastaa ja huoltaa alkavien vikojen havaitsemiseksi sekä korjaamiseksi. Myös laitevalmistajat voivat edellyttää säännöllisiä tarkastuksia sekä huoltamista takuun säilyttämiseksi. (RT-ohjekortti 103076 2019, 15.) Kunnossapitovaiheen merkittävimpiä tehtäviä ovat säännöllisesti suoritettavat kunnossapitotarkastukset, joilla voidaan seurata laitteiston kuntoa ja havaita poikkeamia.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että järjestelmän toimintaa tulee seurata säännöllisesti sekä järjestelmälle on syytä tehdä kattavampi kunnossapitotarkastus vähintään vuosittain (Motiva 2021). Tarkastusten ja huollon tarve sekä väliaikojen pituus voivat vaihdella huomattavasti järjestelmän ominaisuuksien, ympäristön olosuhteiden sekä tuotanto-odotusten mukaan. Aurinkosähköjärjestelmien ylläpidolla pyritään ehkäisemään tulipaloja, varmistamaan järjestelmän turvallinen toiminta sekä parhaimmillaan optimoimaan energiantuotantoa. Lisäksi on hyvä muistaa, että suuri osa tarkastus- ja huoltotehtävistä soveltuu myös maallikoille.

Eri tarkastustehtävät voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan niiden motiivien perusteella. Ensimmäisen kategorian tarkastuksilla pyritään varmistamaan järjestelmän turvallinen toiminta ja toisen kategorian tarkastuksilla pyritään varmistamaan järjestelmän optimaalinen suorituskyky.

Kunnossapitotarkastusten toteuttamisessa voidaan hyödyntää niin aistinvaraista tarkastusta, erinäisiä mittauksia kuin lämpökamerakuvaustakin. Aistinvaraiset tarkastukset ovat nopea keino järjestelmien yleiskunnon varmistamiseen sekä pinnallisten vaurioiden havaitsemiseen. Avoimen piirin jännitteen sekä paneeliketjun virran mittaaminen ovat keino varmistaa järjestelmän normaali sähköinen toiminta sekä ensisijaisia mittauksia vianselvityksessä. Erityisesti aurinkosähköpaneelien sekä liitosten piilevien vikojen havaitsemisessa tehokas menetelmä on lämpökamerakuvaus.

Lämpökamerakuvaus tulee suorittaa pilvettömällä tai pilvisyyden suhteen tasaisella säällä. Auringon säteilytehon tulee olla yli 600 W/m^2 , minkä lisäksi tuulen nopeuden tulee olla vähäinen. Aurinkosähköpaneelien kuvaus on hyvä suorittaa paneelien taustapuolelta, sillä taustapuolen muovikalvo on lämpösäteilyä läpäisevää, jolloin poikkeamien havainnointi on tarkempaa. Kuvauskulman tulee olla mahdollisimman kohtisuora, ja etäisyys tulee valita niin, että jokaista aurinkosähkökennoa kohti tallennetaan vähintään 5×5 pikseliä. Suuret maa-asenteiset aurinkovoimalat on tehokkainta kuvata lämpökameralla varustetulla kuvauskopterilla. (RT-ohjekortti 103076 2019, 15.)

4.2.1 Yleisesti huomioitavia tekijöitä

Aurinkosähköjärjestelmien kunnossapitotarkastuksissa on monia yksittäisiin komponentteihin rajoittumattomia eli yleisesti huomioitavia tekijöitä. Esimerkkejä yleisesti tarkastettavista tekijöistä ovat muun muassa saavutettavuuden rajoittamisen toteutuminen, merkintöjen ja dokumentoinnin kunto sekä ajantasaisuus, yleiset kosteusongelmat ja korrosio sekä ylimääräisen materiaalin kerääntyminen komponenttien läheisyyteen. (Motiva 2021.)

Kaikkien järjestelmän osien yhteydessä tulee varmistua, että asiattomilla henkilöillä ei ole pääsyä niihin. Merkintöjen ja dokumentoinnin ajantasaisuus sekä ole-massaolo on syytä varmistaa. Merkkejä kosteusongelmista tai korroosiosta on syytä etsiä niin kaikista järjestelmän laitteista kuin myös asennuskohteen rakenteista. Lisäksi on syytä tarkastaa, ettei minkään järjestelmäkomponentin taakse tai läheisyyteen ole kerääntynyt palavaa materiaalia, kuten pölyä ja lehtiä. Samoin on varmistettava, ettei laitteissa ole eläinten aiheuttamia vaurioita. (Motiva 2021.)

4.2.2 Asennusjärjestelmät

Asennustelineet sekä johtotiet on syytä tarkastaa korroosion, roikkumisen, muotojen muutosten sekä kiinnitysten kunnan kannalta. Lisäksi tulee kiinnittää huomiota johtoteiden kaapeleiden mekaanisen suojauskyvyn kuntoon sekä potentiaalintasausten liitosten kuntoon. Katoille asennetuissa järjestelmissä on syytä tarkastaa kasvillisuuden kasvun tai muiden uusien rakennelmien, kuten satelliittiantennien, muodostamien varjojen aiheutuminen. Lisäksi on syytä tarkastaa katon mahdollisten läpivientien kunto sekä varmistaa veden poiston riittävä toiminta. On myös tarkastettava, ettei paneeliston ympäristössä ole merkkejä veden kerääntymisestä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 22–23.)

Maatelineisiin asennettujen laitteistojen yhteydessä on syytä kiinnittää huomiota erityisesti telineiden perustuksiin sekä ympäristön mahdollisiin muutoksiin. Maatelineiden perustusten lähistöltä tulee etsiä merkkejä maaperän mahdollisesta eroosiosta sekä telineiden rakenteiden korroosiosta. Lisäksi tulee varmistua, että

järjestelmän ympäristön kasvillisuus ei häiritse paneelien, kaapelointien tai kotelointien toimintaa niin mekaanisesti kuin varjostustenkaan muodossa. Mikäli maa-asenteinen järjestelmä on toteutettu aurinkoseuraajien avulla, tulee varmistaa seuraajien yhteneväinen toiminta. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 19.)

4.2.3 Aurinkosähköpaneelit

Aurinkosähköpaneelien kunnossapitotarkastuksessa pyritään kiinnittämään huomiota merkkeihin, jotka voivat viitata paneelien virheelliseen toimintaan. Virheelliseen toimintaan viittaavia merkkejä ovat esimerkiksi palamisen jäljet, vääristymät, värimuutokset, mikrohalkeamat, eli niin sanotut etanan jäljet, paneelin suojalasin, pinnan tai kehyksen vauriot sekä jatkuvuuden poikkeamat. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 20.) Samalla tulee tarkastaa paneelien ja johdotusten kiinnityksen kunto (RT-ohjekortti 103076 2019, 15). Teknisiä puutteita etsittäessä on samalla hyvä tarkastaa yleisesti paneelien puhtauden taso sekä kiinnittää huomiota merkittävään pölyyntymiseen tai eläinten jätöksiin, jotka voivat aiheuttaa haitallisia paikallisia kuumia pisteitä (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 20).

Aistinvaraisen tarkastuksen ohella lämpökamerakuvaus on tehokas keino paneelien toiminnan varmistamiseksi. Paneelien lämpökuvauksella voidaan nopeasti ja voimalan toimintaa keskeyttämättä havaita muun muassa ohitusdioidien ja juotosliitosten vikoja, löysien ulkoisten liittimien ja huonojen sisäisten liitosten aiheuttamia vikoja sekä vastasuuntaan polarisoituneita aurinkokennoja. Paneelien virhe-toiminnot näkyvät yleisesti joko osittaisena tai koko paneelin alaisena lämpötila-erona toimiviin paneeleihin verrattuna. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 21.)

Paneelivalmistajien yleisesti käytettyjen ohjeistusten mukaan aurinkosähköpaneelit tulisi vaihtaa, mikäli paneeleissa on havaittavissa selkeitä värimuutoksia kennoissa tai kiskoissa verrattuna muihin paneeleihin. Lisäksi paneelit olisi uusittava, jos niissä havaitaan näkyviä koloja, jotka muodostavat reitin kosteudelle sekä varjostumille tai mikäli paneeleissa havaitut vauriot poistavat merkittävän osan paneelien tai kennojen toiminta-alueesta. Lisäksi paneelit suositellaan vaihdettavan, jos niiden suojalasin havaitaan rikkoutuneen tai komponenttien irron-

neen tai paneeleissa on jälkiä valokaarista, palamisesta tai vuotovirroista, haljenneita kennoja tai rasituksen merkkejä kaapeloinneissa. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 21.)

Mikäli tarkastettava järjestelmä on varustettu esimerkiksi paneelitasoisella valvontajärjestelmällä, voidaan sitä hyödyntää paneelien suorituskyvyn seurantaan sekä poikkeamien havaitsemiseen. Jotkin aurinkosähköpaneelien vikatyypit voivat olla luonteeltaan niin epäsäännöllisiä, että ne voidaan havaita vain historia-seurannalla varustetun valvontajärjestelmän avulla. Valvontajärjestelmällä havaittavat poikkeamat paneelitojen tehontuotossa voivat toimia herätteenä esimerkiksi lämpökuvauksen tarpeelle. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 21.)

4.2.4 Invertterit ja laitekotelot

Invertterit tulisi tarkastaa aistinvaraisesti sekä sisä- että ulkopuolelta samalla varmistuen, että puhaltimien tai tuuletuskanavien tiellä ei ole virtausesteitä. Laitteista tulee myös etsiä mahdollisia merkkejä vedestä, pölystä sekä jyrksijöistä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 19.) Lisäksi tulee tarkastaa invertterin varoitusvalot, jotka ilmoittavat mahdollisista vioista. Ukkonen voi myös sammuttaa invertterin, jolloin laitteen uudelleenkäynnistys on usein tarpeen. (Motiva 2021.) Mahdollisesti merkittyjen momenttiliitosten kireys on syytä varmistaa. Lisäksi tulee huomioida valmistajien mahdolliset erityiset tarkastusohjeet. Erityisesti ulos asennettujen invertterien yhteydessä tulee kiinnittää huomiota perustusten ja kiinnitysten eheyteen. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 19.)

Invertterien suunniteltu käyttöikä on tyypillisesti alle puolet paneelien suunnittelusta käyttöiästä. Pienitehoisten invertterien vikaantuessa on yleensä kannattavinta uusien laite kokonaan. Suurempitehoisiin inverttereihin on yleisesti saatavissa modulaarisia varaosia jopa 25 vuoden ajan, jolloin vikaantuneita komponentteja voi olla kannattavaa vaihtaa. (RT-ohjekortti 103076 2019, 15.)

Liitäntäkeskukset ja laitekotelot tulisi tarkastaa mahdollisen heikkenemisen, korroosion sekä roskien tai jyrksijöiden tunkeutumisen varalta. Muiden kuin metalli-

koteloiden mekaaniset ominaisuudet voivat heiketä ajan kuluessa ulkoisten rasi-
tusten vuoksi. Pitkälle kehittynyt korroosio voi aiheuttaa metallikoteloissa säh-
köisten liitäntöjen heikkenemistä sekä muodostaa koteloon pääsyn vedelle, ros-
kille tai jyrsijöille. Koteloon voi kerääntyä tarpeetonta vettä muun muassa raken-
neaurioiden, kondensaation tai koteloon liitettyjen johtoteiden välityksellä. Kote-
loon kerääntynyt vesi voi pienentää kotelon tilavuutta tai muodostaa koteloon uu-
sia johtavia reittejä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 20.)

Koteloihin mahdollisesti tunkeutuneet roskat tai hyönteiset tulee poistaa. Koteloi-
den vähäinen korroosio voidaan pitää hallinnassa säännöllisen huollon avulla.
Korroosion kehittymisen estämiseksi kotelot tulee pitää puhtaana sekä käsitellä
hapettumista estävällä aineella. Lisäksi korroosiolta voidaan pyrkiä suojautu-
maan lisäkoteloinnilla. Kuitenkin merkittävästi heikentyneet kotelot tulisi vaihtaa
kokonaan uusiin. Mikäli koteloinneissa havaitaan merkkejä vedestä, tulisi huolto-
jen yhteydessä tunnistaa veden lähde, ja ohjata se pois kotelosta. Ylimääräinen
vesi voidaan ohjata kotelosta pois tarpeenmukaisilla vedenpoistorei'illä tai muilla
valmistajan hyväksymillä menetelmillä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 20.)

4.2.5 Sähköiset liitokset

Kunnossapitotarkastuksissa tulisi tarkastaa näyteperusteisesti aurinkosähköliitti-
mien eheys sekä etsiä merkkejä lämmön aiheuttamista vaurioista, korroosiosta
sekä veden tunkeutumisesta. Lämpökamerakuvaus on tehokas menetelmä eri-
näisten liitosten kunnan tarkastamiseen aistien lisäksi. Tarkoituksenmukaisesti
määritellyt ja asennetut aurinkosähköliittimet eivät tyypillisesti menetä liitoksen
yhtenäisyyttä. Kuitenkin vialliset aurinkosähköliitokset ovat yksi merkittävimmistä
syistä sarjavalokaarivikojen sekä aurinkosähköjärjestelmien tulipalojen taustalla.
(SFS-EN IEC 62446-2 2020, 21.)

Liitosviat voivat aiheutua monista syistä, kuten eri valmistajien liittimien puutteel-
lisesta sovituksista, puutteellisesta asennuksesta sekä liian suuresta taivutus-
tai vetorasituksesta, mikä voi johtaa löysään liitokseen tai veden tunkeutumiseen
liitokseen. Lisäksi ympäristötekijät, kuten lämpötilan vaihtelu, pakkanen, lika, öljy

tai muut jätteet sekä korroosio voivat aiheuttaa liitosten huonontumista. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 21.)

Sähköisiä liitoksia sisältävät liitäntä- ja laitekotelot olisi syytä avata ja tarkastaa mahdollisten momenttimerkkien asento sekä koteloiden puhtaus. Sähköisistä liitospinnoista, kuten liittimistä sekä varokepitimistä, tulisi etsiä merkkejä valokaa-rien aiheuttamista värimuutoksista. Tasasähköosan liitäntäkeskuksissa käytetään yleisesti ruuviliitoksia paneeliketjujen johtimien yhdistämiseksi varokepitiimiin tai kiskoihin. Ruuviliitosten yhtenäisyys sekä kireys tulee tarkastaa. Lisäksi kotelointien sisäisiltä kontaktipinnoilta tulisi etsiä kerääntynyttä pölyä, joka voi heikentää sähköistä ilmväliä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 19–20.)

Poikkeavat momenttimerkinnät indikoivat liitoksen löystyneen. Puutteelliset liitokset tulee huoltaa jälkikiristyksellä. Liitosten jälkikiristyksessä tulee huomioida laitevalmistajien ohjeistukset. Momenttimerkintöjä ei tyypillisesti voida hyödyntää pienimpien kaapelikenkien tai ruuviliitosten yhteydessä. Tällaisten liitosten kireys tulee varmistaa säännöllisesti momenttiavaimilla tai -ruuvinvääntimillä tehtävillä jälkikiristyksillä. Kotelot on syytä puhdistaa kaikesta roskasta huoltojen yhteydessä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 19.)

4.2.6 Erotus- ja kytkinlaitteet

Erilaiset sähkötekniset mekanismit, kuten erottimet, katkaisijat sekä muut suo-jaus- ja ohjauskomponentit, voivat vaatia säännöllistä kunnossapitävää huoltoa. Tarvittavia huoltotoimenpiteitä voivat olla esimerkiksi vuosittain tehtävät koskettimien avaus- ja sulkutoimenpiteet sekä mekanismien rasvaukset. Mekanismien tarkastus- sekä huoltotoimien määrittämisessä tulee noudattaa laitevalmistajien ohjeistusta. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 20.)

Erityisesti tasasähköosan DC-kytkintä suositellaan verryteltävän vuosittain. DC-kytkin voi olla joko oma erillinen kytkimensä tai se voi olla integroituna invertteriin. Kytkimen säännöllinen verryttely puhdistaa kontaktipintoja ja ehkäisee haitallisen ylimenovastuksen muodostumista. Verryttelyssä järjestelmä sammutetaan joko

kytkemällä invertteri pois päältä tai avaamalla AC-kytkin, minkä jälkeen DC-kytkintä käännetään pois ja päälle noin 10 kertaa. (Motiva 2021.) Ennen DC-kytkimen verryttelyä tulee varmistaa tasasähköpiirin virrattomuus. Lisäksi verryttely olisi hyvä tehdä aikana, jolloin aurinkosähköjärjestelmä ei ole käytössä tuotantohävikin minimoimiseksi.

4.2.7 Johtojärjestelmät

Aurinkosähköjärjestelmän johtimet tulisi tarkastaa erityisesti hankaumien ja eristeaurioiden varalta. Tyypillisen asennusympäristön haastavan luonteen vuoksi erityistä huomiota tulee kiinnittää johtoteiden ja asennustelineiden teräviin kulmiin tai reunoihin sekä liikkuvien asennuksien, kuten seurantajärjestelmien kaapelointeihin. Myös kattojen pintamateriaalit sekä vaihtelevat ympäristöolosuhteet voivat aiheuttaa eristemateriaalien huonontumista. Kaapelointien ohella on syytä kiinnittää huomiota kiinnitysten kuntoon. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 22–23.)

Johdotuksista tulisi etsiä merkkejä liikkeen aiheuttamasta kulumisesta, kiinnitysten aiheuttamasta rasituksesta sekä jyrksijöiden aiheuttamista vaurioista. Samalla on hyvä kiinnittää huomiota kaapelointien merkintöihin ja tunnuksiin. Lisäksi tulee varmistua aurinkosähköjärjestelmän kaapelointien riittävästä etäisyydestä eri jänniteluokkiin. Mikäli johdotuksissa havaitaan merkittävää kulumista, on syytä harkita johdotusten lisäsuojausta tai tarpeen mukaan johtimien korvaamista. Huoltotoimien yhteydessä on syytä korjata rikkoutuneet kaapelikiinnikkeet sekä vapauttaa kaapelit normaalista poikkeavista taivutussäteistä. Erityisesti paneelien roikkuvat yhdyskaapelit tulee kiinnittää, jotta ne eivät altistu liikkeelle sekä haitallisille ympäristöolosuhteille, kuten lumelle, jäälle tai sateelle. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 22.)

4.3 Suorituskykyä ylläpitävät kunnossapitotehtävät

Aurinkosähköjärjestelmien suorituskykyä ylläpitävillä kunnossapitotehtävillä on tarkoitus varmistua järjestelmän suurimmasta mahdollisesta energiantuottokyvystä, jonka laitoksen suunnittelu, asennus, olosuhteet, sijainti ja tekninen ikä

mahdollistavat. Suorituskyvyn varmistamiselle on määritelty erinäisiä testejä ja menettelyjä, joilla voidaan varmistua järjestelmän tarkoituksenmukaisesta toiminnasta. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 23.)

Suorituskykyä ylläpitävien kunnossapitotehtävien laajuus on syytä määrittää jokaiseen kohteeseen yksilöllisesti kustannus-hyötyanalyysin avulla. Joidenkin järjestelmien yhteydessä voi olla taloudellisia kannustimia varmistua laitteiston suorituskyvyn perustason odotuksista sekä mahdollisesti kehittää suorituskykyä perustasoa paremmaksi (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 23).

4.3.1 Varjostukset ja liitosresistanssit

Aurinkosähköjärjestelmän suorituskyvyn kannalta on kriittisen tärkeää arvioida mahdollisten varjostusten osumista aurinkosähköpaneelien vaikutusalueelle. Varjojen arviointia on syytä harkita erityisesti, jos järjestelmän suorituskyvyssä havaitaan merkittävä poikkeama. Aurinkosähköjärjestelmien käyttöönoton yhteydessä tulisi kirjata tiedot varjoista, kuten puista tai kasvillisuudesta, jotka saattavat muuttua ajan kuluessa ja alkaa varjostaa paneeleita. Käyttöönoton yhteydessä kirjattuja varjotietoja tulisi käyttää myöhempien kunnossapitotarkastusten yhteydessä perustasona, johon ajantasaisia varjostumia verrataan. Standardissa IEC 62446-1 esitetään kohdassa 8.4 menettelytapa varjojen arvioinnille. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 23.)

Varjostusten ohella myös johtimien liitosresistanssit ovat oleellinen tekijä aurinkosähköjärjestelmien energiantuoton suorituskyvyn kannalta. Liitosten tarpeettoman suuri ylimenovastus tuottaa häviöitä ja heikentää näin ollen järjestelmän energiantuottoa. Aiemmin esiteltyjen turvallisuutta ylläpitävien kunnossapitotehtävien yhteydessä esitelty sähköisten liitosten tarkastusmenettely sopii sellaisenaan myös liitosresistanssien suorituskyvyn arviointiin. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 23.)

4.3.2 Aurinkosähköpaneelien puhtaanapito

Aurinkosähköpaneelien likaantuminen alentaa järjestelmän energiantuottoa. Paneelien epätasainen likaantuminen voi myös johtaa paikallisten kuumien kohtien muodostumiseen ja edelleen tästä seuraaviin paneelivikoihin. Paneelien puhdistuksen tarve tulisi määrittää kunkin kohteen ominaisuuksien perusteella yksilöllisesti. Puhtaanapitoa ei tarvita välttämättä ollenkaan, mikäli kohteen ympäristöolosuhteet, ilmasto sekä sademäärä estävät lian kerääntymisen. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 25–26.)

Mikäli paneelien likaantumisen havaitaan olevan tasaista, voi olla kannattavaa tehdä puhtaanapidon tarpeesta kustannus-hyötyanalyysi, jonka avulla voidaan määrittää säännöllisen puhdistuksen tarpeellisuus sekä kannattavuus. Jos puhdistus nähdään tarpeelliseksi, puhdistusväli voidaan määritellä tehtäväksi esimerkiksi säännöllisin väliajoin tai olosuhteisiin perustuen. Halutessa likaantumisen vaikutusta ja puhdistustarvetta voidaan seurata esimerkiksi likaantumisanturiin avulla. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 25–26.)

Paneelien likaantumisen ja puhdistustarpeen määrittämiseen vaikuttavat asennusympäristön paikalliset lian lähteet. Esimerkiksi taajamaympäristössä tyypillisiä lian lähteitä ovat muun muassa rakennuspöly, dieselnoki sekä teollisuuden päästöt. Paneelit voi olla syytä puhdistaa merkittävästi pölyttävän rakennustyömaan valmistumisen jälkeen. Lisäksi dieselnoki ja teollisuuden päästöt voivat muodostaa paneelistoille säännöllisen puhdistuksen tarpeen. Maaseutuympäristössä voi myös muodostua merkittävää pölyä kylvön aikaan, minkä vuoksi voi olla kannattavaa puhdistaa paneelit liasta kylvöjen valmistuttua. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 25–26.)

Asennusympäristöstä riippumattomia lian lähteitä voivat olla muun muassa siitepöly, lintujen jätökset sekä orgaanisen materiaalin, kuten jäkälän tai levän kasvu paneelien pintaan. Siitepölyn puhdistus voidaan ajoittaa tehtäväksi säännöllisesti siitepölykauden jälkeen. Lintujen jätösten ja orgaanisten materiaalien kerääntymistä paneelien pintaan tulee seurata säännöllisesti ja suorittaa puhtaanapitoa tarveperusteisesti. Tuntemattomien, aurinkosähköpaneelien suorituskykyä mer-

kittävästi heikentävien lianlähteiden alkuperä voidaan myös selvittää laboratorio-analyysillä, jos tämä nähdään tarpeelliseksi. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 25–26.)

Paneelien puhdistustoimenpiteissä tulee aina noudattaa valmistajan suosituksia sekä erityistä varovaisuutta, jotta vältetään komponenttien vauriot. Mikäli tarpeellisia puhdistusohjeita ei ole käytettävissä, on suositeltavaa käyttää paneelien puhdistuksessa pelkkää vettä ja välttää happamia puhdistusaineita. Puhdistuksessa tulisi ehkäistä veden valumista sekä käyttää pienipaineisia sumuttimia ja pehmeitä pesuvälineitä. Lisäksi puhdistus tulisi tehdä heikoissa säteilyolosuhteissa, millä pyritään välttämään mahdolliset vauriot kuumissa tai osittain varjostuneissa paneeleissa sekä minimoimaan energiantuotannon hävikkiä. Suurille järjestelmille on saatavana myös esimerkiksi robottipuhdistusjärjestelmiä. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 26.)

Paneelien päälle kerääntyy talvisin lunta. Paneeliston rakenne voi vaikuttaa kertyvän lumen määrään joko lisäävästi tai vähentävästi. Jyrkästi kallistetuissa paneelistoissa lumi yleensä liukuu pois paneelien päältä, kun taas loivemmin kallistetuissa paneelistoissa lumi kerääntyy todennäköisimmin paneelien pintaan. Eriyisesti tasakattoasenteisissa aurinkosähköjärjestelmissä lumi voi myös kinostua paikallisesti tuulen vaikutuksesta. Tyypillisesti lumen poistaminen ei ole suositeltavaa, mutta toisinaan se voi olla tarpeen esimerkiksi lumikuorman alentamiseksi tai jääpatjojen poistamiseksi. Ensisijaisesti suositeltava väline lumen poistamiseksi on tehokas puhallin. Mekaanisten työvälineiden käyttöä on syytä välttää, jotta paneelien pintaa ei vaurioiteta. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 27.)

4.3.3 Sähköiset ominaisuudet

Aurinkosähköjärjestelmien sähköisten ominaisuuksien suorituskyvystä varmistutaan yleisesti vain vasteena suorituskykypoikkeamiin. Lisäksi sähköisten ominaisuuksien suorituskykyä voidaan seurata energiantuotannon valvomiseksi. Sähköisten toimintaominaisuuksien, kuten paneeliketjujen jännitteiden ja virtojen arvot, mitataan ja dokumentoidaan järjestelmän käyttöönoton yhteydessä. Käyt-

töönoton yhteydessä määritettyjä arvoja pidetään järjestelmän perustason arvoina. Mikäli järjestelmän suorituskyvyssä havaitaan myöhemmin poikkeamia, voi olla tarpeen tehdä kunnossapitomittauksia, joissa saatavia arvoja verrataan käyttöönoton yhteydessä mitattuihin perustason arvoihin. Mittauksia voidaan tehdä tarpeen mukaan joko näyteperusteisesti tai kaikille paneeliketjuille. Mikäli tutkittava järjestelmä on varustettu paneelitasoisella valvontajärjestelmällä, voidaan mittauksilla selvitettävät arvot todeta myös valvontajärjestelmän historia-seurannasta. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 24.)

Kunnossapitomittauksilla pyritään tyypillisesti tarkastamaan järjestelmän jännite, toimintavirta sekä määrittämään järjestelmän virta-jännite-käyrä. Järjestelmän jännitteen tarkastuksessa mitataan paneeliketjujen avoimen piirin jännite V_{oc} . Mittaustulosten avulla pyritään tarkastamaan, että paneeliketjujen jännitteet ovat tasapainossa sekä oikein johdotettu. Jännitemittausten avulla voidaan tunnistaa myös paneelien ohitusdiodien oikosulut tai muut ongelmat. Jännitemittaukset tulee tehdä standardin IEC 62446-1 kohdan 6.4 mukaisesti. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 24.)

Vastaavasti paneeliketjujen toimintavirta tulee mitata standardin IEC 62446-1 kohdan 6.5.3 mukaisesti. Mittauksissa saatuja arvoja verrataan käyttöönoton yhteydessä määritettyihin perustason arvoihin säteilyolosuhteet huomioiden. Lisäksi yksittäisten paneeliketjujen mittaustuloksia tulee verrata toisiinsa. Tasaisissa säteilyolosuhteissa mitattujen arvojen tulisi olla likimain samoja. Yleisenä ohjeena voidaan pitää, että toimivassa järjestelmässä mitattujen arvojen tulisi olla enintään $\pm 5\%$ mittausten keskiarvosta. Paneeliketjujen virran mittauksella voidaan löytää yksittäisiä heikosti toimivia paneeleita. Yksittäisiä paneeleja ei voida kuitenkaan löytää, mikäli useammassa paneeliketjuissa on heikosti toimivia paneeleita. Tietyissä tapauksissa yksittäiset heikosti toimivat paneelit voidaan löytää ainoastaan paneelitason valvontajärjestelmän avulla. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 24.)

Osana suorituskykyyn perustuvaa kunnossapitoa tulisi määrittää säännöllisesti paneeliketjujen virta-jännite-käyrä. Virta-jännite-käyrän avulla voidaan tunnistaa paneelien komponenttien vikoja tai merkittävä suorituskyvyn alentuminen. Käyrän määrittämistä suositellaan erityisesti järjestelmissä, joissa ei ole paneelitason

elektroniikkaa, kuten mikrovaihtosuuntaaja tai DC-DC-suuntaajaa. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 24–25.)

Virta-jännite-käyrän avulla voidaan määrittää useita suoritusarvoja, kuten paneeliston avoimen piirin jännite V_{OC} , oikosulkuvirta I_{SC} , suurimman tehon jännite V_{MPP} , -virta I_{MPP} , -teho P_{MAX} sekä täyttökerroin FF . Virta-jännite-käyrän määrittäminen tulee tehdä standardin IEC 62446-1 kohdan 7.2 mukaisesti. (SFS-EN IEC 62446-2 2020, 24–25.) Virta-jännite-käyrän määrittämiseen käytetään erillistä, mittaukseen soveltuvaa mittalaitetta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Aurinkosähköjärjestelmien toteuttaminen koostuu useista teknisistä osa-alueista, joissa tehtäviä ratkaisuja ohjaa koko järjestelmäkokonaisuus. Toteutusperiaatteiden keskiössä ovat järjestelmässä käytettävät aurinkosähköpaneelit, joiden tyyppi, määrä sekä kytkentätapa määrittävät muilta järjestelmäkomponenteilta vaadittavat ominaisuudet sekä järjestelmään toteutettavat suojausmenetelmät. Järjestelmässä käytettävät komponentit tulee lähtökohtaisesti mitoittaa, valita ja asentaa jokaiseen toteutuskohteeseen yksilöllisesti. Toimivien, turvallisten sekä suorituskyvyltään optimaalisten järjestelmien toteuttaminen vaatii vahvaa sähkötekniistä osaamista sekä aurinkosähköalan teknisen kehityksen jatkuvaa seuranta. Toteuttamisen vaatimustaso nousee erityisesti järjestelmäkokojen kasvaessa, sillä suuritehoisten aurinkovoimaloiden toteuttaminen vaatii aina kohdekohtaisia, asennusympäristön olosuhteet huomioivia yksilöllisiä ratkaisuja.

Järjestelmien kunnossapidossa merkittävimpiä tehtäviä ovat jatkuva seuranta sekä säännöllisesti tehtävät kunnossapitotarkastukset, joilla voidaan seurata laitteiston kuntoa ja havaita poikkeamia. Tarkastuksilla pyritään varmistamaan järjestelmän turvallinen toiminta sekä optimaalinen suorituskyky. Järjestelmien toimintaa on erityisen tärkeää seurata muutaman ensimmäisen vuoden aikana asennuksesta, koska kyseisen ajanjakson aikana riskit tyypillisimmin realisoituvat. Aurinkosähköjärjestelmien keskeisimmiksi turvallisuusriskeiksi ovat osoittautuneet tasasähköosassa käytetyt liitostarvikkeet sekä kytkinlaitteet. Turvallisuutta ylläpitävässä kunnossapidossa tulisi säännöllisesti tarkastaa liitosten kunto sekä puhdistaa kytkinlaitteiden kontaktipintoja. Suorituskykyä ylläpitävässä kunnossapidossa tärkeimpiä tehtäviä ovat varjostusten, likaantumisen sekä kasvillisuuden seuranta sekä näiden tarpeenmukainen hallinta. Opinnäytetyössä selvitettyt keskeisimmät suositeltavat kunnossapito- ja huoltotehtävät on koottu taulukkomuotoon raportin liitteeksi.

Opinnäytetyön kirjoittajan mielestä työn tavoitteisiin päästiin suunnitellusti. Opinnäytetyö esittää laajasti toteutusvaiheen teknisen sisällön sekä eri osa-alueissa tehtävien ratkaisujen perustan. Työssä käsitellään esimerkinomaisesti kunnos-

sapitovaiheen suositeltavia tehtäviä sekä näillä saavutettavia hyötyjä. Opinnäytetyössä tehty tutkimus oli kokonaisuudessaan erittäin opettavainen ja mielenkiintoinen. Aurinkosähköjärjestelmiä voisi pitää lähtökohtaisesti verrattain yksinkertaisina laitteistoina, mutta tutkimuksessa tehtyjen havaintojen perusteella toteuttamista ja kunnossapitoa ohjaavat niin useat säädökset, tekniset vaatimukset kuin tuotanto-odotuksetkin. Toteuttamisen vaatimustaso nousee varsinkin järjestelmäkokojen kasvaessa, jolloin kohdekohtaisia ratkaisuja tehdään enemmän ja toteutuksen onnistuminen vaatii monen eri osa-alueen kokonaisvaltaista hallitsemista.

Aurinkosähköjärjestelmien suosio kasvaa kiihtyvällä tahdilla, ja samalla alan teknologinen kehitys etenee nopeasti. Järjestelmien kustannustason lasku sekä aurinkosähkön tuotannon taloudellista kannattavuutta parantavat lainsäädännön muutokset muodostavat perustellun syyn odottaa aurinkosähkön tuotannon yhä suurempaa suosiota. Tyypillisen aurinkosähköjärjestelmän rakenne on pitkään koostunut perinteisistä aurinkosähköpaneeleista sekä keskitetystä invertteristä, mikä on osaltaan rajannut järjestelmien hyödyntämistä. Uusien paneeliteknologioiden sekä tehomuunninsovellusten avulla aurinkosähköjärjestelmiä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää mitä monimuotoisemmissa sovelluksissa, mikä luo opinnäytetyölle jatkokehitysmahdollisuuden tulevien aurinkosähköteknologioiden tutkimiseen. Seuraavan sukupolven aurinkosähkökennot valmistetaan mitä todennäköisimmin uusista materiaaleista ja aurinkosähköpaneeleita voidaan asentaa moniin eri pintoihin. Tulevaisuuden laitteistot sekä asennustavat asettavat toteutus- ja kunnossapitoperiaatteille väistämättä uusia vaatimuksia, joihin perehtyminen on monipuoliseen ja ajantasaiseen osaamiseen tähtäävälle sähköalan ammattilaiselle välttämätöntä.

LÄHTEET

Biernat, K., Malinowski, A. & Gnat, M. 2013. The Possibility of Future Biofuels Production Using Waste Carbon Dioxide and Solar Energy. IntechOpen. DOI: 10.5772/53831. Tulostettu 23.3.2021. <https://www.intechopen.com/books/bio-fuels-economy-environment-and-sustainability/the-possibility-of-future-biofuels-production-using-waste-carbon-dioxide-and-solar-energy>

EC&M. 2012. The Highs and Lows of Photovoltaic System Calculations. Tulostettu 22.3.2021. <https://www.ecmweb.com/renewables/article/20896643/the-highs-and-lows-of-photovoltaic-system-calculations>

EIA. 2020. Solar explained. Photovoltaics and electricity. Päivitetty 18.3.2020. Tulostettu 24.3.2021. <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>

Energiateollisuus ry. 2016. Verkostosuositus YA 9:13. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Päivitetty 27.4.2016. Tulostettu 9.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.sahkoverkkoekstra.fi/>

Energiateollisuus ry. 2021. Energiavuosi 2020. Sähkö. Tulostettu 9.2.2021. https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2020_netti.pdf

Energiateollisuus ry. n.d. Hajautettua sähkön pientuotantoa. Tulostettu 24.3.2021. https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_pientuotanto

Holopainen, H. 2020. Sähkö tekee aurinkopaneelistä tulipalossa vaarallisen – erityisesti tee-se-itse -asennukset huolestuttavat. Tulostettu 21.3.2021. <https://yle.fi/uutiset/3-11230928>

IEA-PVPS. 2020a. National Survey Report of PV Power Applications in Finland - 2019. Tulostettu 9.2.2021. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/09/NSR_Finland_2019.pdf

IEA-PVPS. 2020b. Trends in Photovoltaic Applications. Tulostettu 9.2.2021. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf

IEC 62548. 2016. Aurinkosähköpaneelistot. Suunnitteluvaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 4.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. 2019. Finland's Integrated Energy and Climate Plan. Tulostettu 9.2.2021. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161977>

Motiva. 2020a. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Päivitetty 5.8.2020. Tulostettu 24.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

Motiva. 2020b. Auringosta sähköä. Päivitetty 5.8.2020. Tulostettu 2.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa

Motiva. 2020c. Aurinkopaneelien asentaminen. Päivitetty 5.8.2020. Tulostettu 3.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Motiva. 2020d. Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä. Päivitetty 5.8.2020. Tulostettu 2.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_kytkeमतон_aurinkosahkojarjestelma

Motiva. 2020e. Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Päivitetty 5.8.2020. Tulostettu 2.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma

Motiva. 2021. Aurinkosähkön paloturvallisuus. Päivitetty 27.1.2021. Tulostettu 29.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_paloturvallisuus

Mounting Systems GmbH. n.d. Ground-mounted kits for small projects. Tulostettu 5.4.2021. <https://www.mounting-systems.com/en/product/ground-mount-kits/>

Orima-Tuote Oy. n.d. Solar-tuotteet. Tulostettu 4.4.2021. <https://orima.fi/orima-solar/>

Rakennustieto. 2019. RT-ohjekortti 103076. Verkkoon kytketyt aurinkosähköjärjestelmät. Tulostettu 9.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt.rakennustieto.fi/aloitus>

Rasinkoski, A. 2020. Aurinkosähköjärjestelmien paloriskit ja sammutusturvallisuus. Kirjallisuusselvitys ja näkemys Suomen tilanteeseen 2019. Tulostettu 21.3.2021. https://www.motiva.fi/files/17365/Aurinkosahkojarjestelmien_paloris-kit_ja_sammutusturvallisuus.pdf

SFS 6000-4-43. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 29.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS 6000-5-52. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 4.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS 6000-5-55. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-55: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Muut sähkölaitteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 9.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS 6000-7-712. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-712: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 4.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS-EN 62446-1. 2016. Aurinkosähköjärjestelmät. Vaatimukset dokumentaatiolle, kunnossapidolle ja testaamiselle. Osa 1: Sähköverkkoon kytketyt järjestelmät. Dokumentaatio, käyttöönottestit ja tarkastus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 3.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

SFS-EN IEC 62446-2. 2020. Aurinkosähköjärjestelmät. Vaatimukset dokumentaatiolle, kunnossapidolle ja testaamiselle. Osa 2: Sähköverkkoon kytketyt järjestelmät. Aurinkosähköjärjestelmän kunnossapito. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 3.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/>

Sähkötieto ry. 2017. ST-käsikirja 40. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Tulostettu 2.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://severi.sahkoinfo.fi/>

Sähkötieto ry. 2021. ST-käsikirja 40. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. 2. uudistettu painos. Tulostettu 7.4.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://severi.sahkoinfo.fi/>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). 2020. Aurinkosähköjärjestelmät. Tulostettu 21.3.2021. <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat>

Valtioneuvoston asetus sähköntoimituksen selvityksestä ja mittauksesta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta 22.12.2020/1133. Tulostettu 4.4.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20201133>

LIITTEET

Liite 1. Suositeltavat kunnossapitotehtävät

1 (4)

Koko järjestelmässä yleisesti huomioitavia tekijöitä	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> Pääsy aurinkosähköjärjestelmän komponentteihin 	<ul style="list-style-type: none"> Lukitusten, liitosten tai kotelointien puutteiden korjaus
<i>Huom. > 1000 VDC järjestelmissä pääsy rajattava vain sähköalan ammattihenkilöille</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Läpivientien vesitiiviys sekä vedenpoiston toimivuus 	<ul style="list-style-type: none"> Tiivistysten korjaus tai tukosten ja kertymien poisto
<ul style="list-style-type: none"> Komponenttien korroosio 	<ul style="list-style-type: none"> Koteloinnin korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> Palavat materiaalit komponenttien läheisyydessä 	<ul style="list-style-type: none"> Puhdistus
<i>Huom. roskat, lehdet, varastoidut tavarat yms.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Eläinten aiheuttamat vauriot 	<ul style="list-style-type: none"> Vaurioiden korjaus, lisäsuojaus tai soveltuvien karkotusvälineiden lisäys
<ul style="list-style-type: none"> Järjestelmän merkintöjen ja dokumentoinnin olemassaolo sekä ajantasaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> Tarvittavien merkintöjen lisäys tai dokumenttien laadinta
<i>Huom. varoitusmerkit vähintään liittymispisteessä, sähköenergian mittauspisteessä sekä aurinkosähköjärjestelmän liitäntäpisteessä. Käytettävissä olevia dokumentteja vähintään käyttöönottopöytäkirja, käyttöohjeet, hätäpysäytyksen ohjeet sekä johdotuskaavio.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Suojausmenetelmien vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> Virheellisten suojausmenetelmien korjaus
<i>Huom. suojaus sähköiskulta, suojaus eristysvioilta, ylivirtasuojaus, ylikuormitussuojaus, suoja- maadoitus- ja potentiaalintasaus, ylijännite- ja salamasuojaus, estodiodit, sähkökeskusten ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Tiedonkeräys- ja valvontajärjestelmien ylläpito 	<ul style="list-style-type: none"> Järjestelmän ominaisuuksien mukaan

(jatkuu)

Johtotiet, asennusjärjestelmät ja potentiaalintasaukset	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Johtoteiden läpiviennit, tiivisteet, liitokset, kuluminen ja korrosio 	<ul style="list-style-type: none"> • Johtoteiden korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> • Peitettyjen johtoteiden kansien avaus asennuksen, tiiviyn ja jyräjoiden tarkistamiseksi 	<ul style="list-style-type: none"> • Puhdistus ja vaurioiden korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Asennusjärjestelmien korrosio, roikkuminen, muodonmuutokset sekä kiinnitykset 	<ul style="list-style-type: none"> • Asennusjärjestelmien korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> • Ympäristön painumisen, lian, pakkasen tai eroosion aiheuttama liike asennusjärjestelmissä 	<ul style="list-style-type: none"> • Asennusjärjestelmien korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> • Laitekoteloiden, rakenteiden, paneelikehysten, johtoteiden sekä laiteperustusten potentiaalintasausliitännät 	<ul style="list-style-type: none"> • Heikentyneiden liitäntöjen kiristys tai korvaus tarpeen mukaan
<i>Esim. aistinvaraisin tarkastuksin näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Potentiaalintasausliitosten jatkuvuuden mittaaminen 	<ul style="list-style-type: none"> • Soveltuvat jatkuvuusmittaukset
<i>Huom. epäiltäessä liitosten huonontuneen</i>	

Aurinkosähköpaneeliston turvallisuus	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Halkeamat, laminointivirheet, murtumat ja palamisen merkit 	<ul style="list-style-type: none"> • Paneelien korvaaminen
<i>Esim. aistinvaraisin tarkastuksin näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Mikrohalkeamat eli ns. etanan jäljet 	<ul style="list-style-type: none"> • Paneelien korvaaminen
<i>Esim. aistinvaraisin tarkastuksin näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Paneelien vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisten paneelien korvaaminen
<i>Huom. paneelit SFS-EN 61730-1, 61215 tai 61646 vaatimusten mukaan, liitäntäkotelot IP65, kaksoiseristys, mikäli $V_{oc} > 120$ VDC</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Paneelien liituskoteloiden, sisäisten liitäntöjen tai aurinkosähkökennojen lämpökamerakuvaus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisten komponenttien korvaaminen
<i>Esim. näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten pitävyys sekä kunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Löysien ja vaurioituneiden liitosten korjaus
<i>Esim. aistinvaraisin tarkastuksin näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Liittimien vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisten liittimien korvaaminen
<i>Huom. liittimet SFS-EN 50521 tai 62852 vaatimusten mukaan</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten lämpökamerakuvaus 	<ul style="list-style-type: none"> • Löysien ja vaurioituneiden liitosten korjaus
<i>Esim. näyteperusteisesti</i>	

Invertteri	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Merkkivalojen ja näyttöjen aistinvarainen tarkastus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virhetilanteessa vianselvitys
<ul style="list-style-type: none"> • Kotelon ulkopuolinen kunto, esim. vauriot ja korroosio 	<ul style="list-style-type: none"> • Koteloinnin korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> • Kotelon sisäpuolinen kunto, esim. vesi, pöly ja jyräjät 	<ul style="list-style-type: none"> • Puhdistus ja vaurioiden korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten tarkastus esim. väännön ja palon jälkien varalta 	<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten jälkikiristys tai vaurioituneiden komponenttien korvaus sekä vianselvitys
<ul style="list-style-type: none"> • Invertterin vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisen invertterin korvaaminen
<i>Huom. invertterit esim. SFS-EN 62109-1 sekä 62109-2 vaatimusten mukaan</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Laitevalmistajan edellyttämä kunnossapito 	<ul style="list-style-type: none"> • Valmistajan ohjeistuksen mukaan

Laite- ja liitäntäkotelot	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Kotelon ulkopuolinen kunto, esim. vauriot ja korroosio 	<ul style="list-style-type: none"> • Koteloinnin korjaus, vaurioiden hallinta, lisäsuojaus tai korvaus tarpeen mukaan
<ul style="list-style-type: none"> • Kotelon sisäpuolinen kunto, esim. vesi, pöly ja jyräjät 	<ul style="list-style-type: none"> • Puhdistus ja vaurioiden korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten kiristysmomenttimerkit 	<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten jälkikiristys
<ul style="list-style-type: none"> • Palosta tai valokaarista johtuvat merkit liittimissä, kiskoissa tai sulakkeissa 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaurioituneiden komponenttien korvaus sekä vianselvitys
<ul style="list-style-type: none"> • Pölyä keräävät liitospinnat 	<ul style="list-style-type: none"> • Liitospintojen puhdistus sekä pölyntymisen esto
<ul style="list-style-type: none"> • Liitosten lämpökamerakuvaus 	<ul style="list-style-type: none"> • Löysien ja vaurioituneiden liitosten korjaus
<i>Esim. näyteperusteisesti</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Sähkömekaaniset toiminnot 	<ul style="list-style-type: none"> • Valmistajan ohjeistuksen mukaan, esim. verryttelykäyttö sekä rasvaus
<i>Huom. DC-kytkimelle suositellaan vuosittaista verryttelykäyttöä</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Suojalaitteiden eheys 	<ul style="list-style-type: none"> • Viallisten korvaaminen sekä vaihto ennen ikääntymisestä aiheutuva vikaa
<ul style="list-style-type: none"> • Suojalaitteiden vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisen suojalaitteen korvaaminen
<i>Huom. gPV varokkeet SFS-EN 60269-6, tasasähköosan ylijännitesuojat SFS-EN 50539-11 sekä vaihtosähköosan ylijännitesuojat SFS-EN 61643-11 vaatimusten mukaan</i>	

Kaapeloinnit	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien hankautuminen teräviin pintoihin 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien hankautumisen esto, lisäsuojaus tai vaurioiden korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien taivutussäteet sekä puristumisvaarat 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien taivutusten tai puristusten vapautus, lisäsuojaus tai vaurioiden korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien kiinnitysten sekä mekaanisen suojauksen kunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien uudelleenkiinnitys tai suojauksen korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Merkit kaapelointien kulumisesta tai vedonpoistojen vaurioitumisesta 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaurioiden tai vedonpoistojen korjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Johdinsilmukoiden esiintyminen 	<ul style="list-style-type: none"> • Johtimien uudelleenreititys
<ul style="list-style-type: none"> • Kaapelointien vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisten kaapelointien korvaaminen
<p><i>Huom. tasasähköosan kaapeloinnit SFS-EN 50618 vaatimusten mukaan, jatkuvan kuormitettavuuden mitoitus SFS 6000-5-52 sekä 6000-7-712 vaatimusten mukaan, vaihtosähköosan syöttökaapelin suositellaan olevan konsentrisella johtimella varustettu</i></p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Ylikuormitussuojauksen vaatimustenmukaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Virheellisten suojausmenetelmien korjaus
<p><i>Huom. kaapelointien jatkuvan kuormitettavuuden mitoitus, > 2 rinnakkaisen paneeliketjun ylivirtasuojaus</i></p>	

Aurinkosähköpaneeliston suorituskyky	
Tarkastuksen kohde	Puutteiden huoltotoimenpiteet
<ul style="list-style-type: none"> • Varjojen lähteiden tarkastus ja vertailu käyttöönottilanteeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Varjojen lähteiden poistaminen, vaikutusten vähentäminen tai ennakoiva poisto
<ul style="list-style-type: none"> • Likaantumisasasteen tarkastus 	<ul style="list-style-type: none"> • Puhdistus sekä tarpeen mukaan likaantumisen estotoimet
<ul style="list-style-type: none"> • Kasvillisuuden hallinta, erityisesti maasenteisissä järjestelmissä 	<ul style="list-style-type: none"> • Haitallisen kasvillisuuden leikkaus, poisto tai ohjaus
<ul style="list-style-type: none"> • Paneeliketjujen avoimen piirin jännitteen V_{OC} mittaus ja vertailu käyttöönottilanteeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Suorituskykypuutteiden juuri-syyn selitys sekä korjaus
<p><i>Huom. tyypillisesti vasteena suorituskykypoikkeamiin</i></p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Paneeliketjujen toimintavirran mittaus ja vertailu käyttöönottilanteeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Suorituskykypuutteiden juuri-syyn selitys sekä korjaus
<p><i>Huom. tyypillisesti vasteena suorituskykypoikkeamiin</i></p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Paneeliketjujen virta-jännite-käyrän määrittäminen ja vertailu käyttöönottilanteeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Suorituskykypuutteiden juuri-syyn selitys sekä korjaus
<p><i>Huom. tyypillisesti vasteena suorituskykypoikkeamiin</i></p>	