

Utriainen Timo

Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuusris- kien kartoittaminen ja niiden minimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

29.9.2017

Tekijä Otsikko	Timo Utriainen Aurinkosähköjärjestelmien paloriskien kartoittaminen ja niiden minimointi
Sivumäärä Aika	34 sivua + 1 liite 29.9.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Osmo Massinen Paloturvallisuussuunnittelija Arttu Sjöstedt
<p>Insinööriyön aiheena on kartoittaa aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamia paloturvallisuusriskejä ja tapoja niiden minimoimiseksi. Aurinkosähköjärjestelmien nopean kehityksen ja voimakkaasti lisääntyneen käytön takia aihe on erittäin ajankohtainen.</p> <p>Tavoitteena on kerätä tietoa aurinkosähköjärjestelmien toiminnasta, sekä niihin liittyvistä suosituksista ja määräyksistä. Käytetyt lähteet sisältävät SFS 607 käsikirjan tietoja ja pelastuslaitoksilta saatuja tilastoja. Kerätyn tiedon pohjalta on tarkoitus tehdä päätelmiä aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien tulipalojen syistä ja mahdollisista tavoista niistä aiheutuvan paloriskin vähentämiseksi.</p> <p>Työn tavoite toteutuu ja voidaan todeta paloturvallisuusriskin olevan pieni, mutta järjestelmien lisääntyvän käytön mukana paloon johtavien tapaturmien määrä kasvaa. Yleisimmät tapaturmien syyt olivat asennuksesta tai vioittuneista komponenteista johtuvia. Tapoja paloriskien minimoimiseksi voivat olla esimerkiksi valokaarivikasuojat, palamattoman alustan käyttö ja aktiivinen järjestelmän kunnon seuranta.</p> <p>Valmiin työn pohjalta voidaan vastata aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuuteen liittyviin kysymyksiin.</p>	
Avainsanat	Aurinkosähkö, Tulipalo, Paloriski

Author(s) Title	Timo Utriainen Fire Safety Risks Related to Solar Electric Systems and Ways to Minimize Them
Number of Pages Date	34 pages + 1 appendix 29 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power Engineering
Instructor(s)	Osmo Massinen, Senior Lecturer Arttu Sjöstedt, Fire safety designer
<p>The goal of this study was to investigate the possible fire risks which are present in solar electric systems and ways to minimize them. Usage of solar electric systems has been increasing dramatically over the past few years, which makes the subject highly topical.</p> <p>To reach this goal a summary of how solar electric systems operate will be presented, with the addition of a short overview of current guidelines and standards concerning the said systems. Sources of information include the SFS-607-handbook and statistics provided by the fire department. The actual fire risk aspects of solar electric systems will be considered after reviewing briefly the theory and causes of common electric fires. Based on the gathered information, conclusions regarding the most common causes of fire and ways to minimize them will be discussed.</p> <p>As the result, it can be said that the risk of fire in photovoltaic systems is very minor. Nevertheless, as the amount of PV-systems is increasing so will the cases of fire. The most common causes of fire were faulty installations and defective components. As means to minimize the fire risks, protection measures such as arc fault detectors, usage of a fire-resistant base and active monitoring of the system could be implemented.</p> <p>This thesis will provide a study which can be further used to address fire safety questions arising regarding the utilization of solar electric systems.</p>	
Keywords	Solar electric systems, fire risk, solar panel

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkosähköjärjestelmä	2
2.1	Paneelityypit ja rakenne	5
2.2	Invertterit	9
2.3	Asennusrakenteet	10
2.4	Varastointi	12
3	Standardit ja suositukset	13
4	Sähköpalot	16
4.1	Sähköpurkaukset ja oikosulut	16
4.2	Sähköpalotilastoja	18
5	Aurinkosähköjärjestelmien palot	19
5.1	Tilastot	20
5.2	Huomioita aurinkosähköjärjestelmien paloista	22
6	Aurinkosähköjärjestelmien palojen syitä	23
6.1	Valokaaret	24
6.2	Kuumat pisteet	26
6.3	Pohdintaa palojen syistä	26
7	Vikatilanteiden havaitseminen	29
8	Järjestelmän suojaus	30
8.1	Valokaarivikasuoja	30
8.2	Salamasuojaus	31
8.3	Mekaaninen suojaus	32
9	Yhteenveto	33
	Lähteet	35

Liitteet

Liite 1. 20kW aurinkosähköjärjestelmän esimerkkisuunnitelma

Lyhenteet

AFD Arc fault detector, Valokaarivikasuoja.

BAPV Building attached photovoltaic, Rakennukseen liitetty aurinkosähkö.

BIPV Building integrated photovoltaic, Rakennukseen integroitu aurinkosähkö.

MPPT Maximum power point tracking, Maksimitehopisteen seuranta.

PV Photovoltaic, Valosähköinen.

SPD Surge protector device, Ylijännitesuoja.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on laatia selvitystyö aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamasta paloturvallisuusriskistä ja sen minimoimisesta. Lisäksi työssä selvitetään olemassa olevia vaatimuksia ja suosituksia järjestelmien toteutusta koskien sekä tapoja paloriskien minimoimiseksi.

Asennetun aurinkosähkön, (PV, photovoltaic) määrä Suomessa on kasvanut voimakkaasti. Vuonna 2017 aurinkosähkön pientuotantoa oli suomessa 27 MW, kun sen määrä vastaavasti oli 2-vuotta aiemmin (2015) 8 MW [1]. Asennusten määrä on siis kolminkertaistunut noin vuoden aikana. Aurinkopaneelien suosion lisääntymiseen voidaan löytää monia syitä, mutta tärkeimpinä voidaan pitää paneelien hintojen laskua sekä omaan käyttöön tuotetun sähkön vapautumista siirtomaksuista ja sähköveroista. Näiden lisäksi myönnetyt kotitalousvähennykset ja TEM-ministeriön jakamat tuet ovat tehneet aurinkosähköstä varteenotettavan vaihtoehdon.

Rakennuksien katoille tai julkisivuihin asennettavat järjestelmät ovat erityisesti herättäneet kiinnostusta. Nämä rakennuksiin integroitavat paneelit, (BIPV, building integrated photovoltaics) tai rakennuksien yhteyteen asennettavat paneelit (BAPV, building attached photovoltaics) ovat ratkaisuja, joiden hyödyntämistä yhä useammassa uudessa ja vanhassa rakennuskohteessa pohditaan. Integroitu aurinkosähköjärjestelmä on erinomainen tapa tuottaa sähköä muuten ”hukkaan” menevällä pinta-alalla. Rakennuksiin integroitavat sähköjärjestelmät voivat kuitenkin olla myös paloturvallisuusriski, ja niitä koskevat kansainväliset standardit ovat vielä valmisteilla.

Kuten kaikissa sähkölaitteissa myös aurinkosähköjärjestelmissä piilee riski tapaturmille. Aurinkosähköjärjestelmiä pidetään yleisesti hyvin turvallisena, eikä tilastoituja tapaturmia ole paljoa. Kuitenkin tapaturmien riski on olemassa ja aurinkosähköjärjestelmän luonteen takia tapaturmat voivat usein olla vakavia ja asettaa haasteita niin pelastuslaitokselle kuin myös asukkaille. Palon havaitseminen voi olla vaikeata, sillä katolla ei ole palohälyttimiä tai automaattista sammutuslaitteistoa. Aurinkopaneelien tulipalo yleensä huomataan vasta ulkona savun ja liekkien muodossa. Paneelit myös jatkavat sähköntuotantoa niin kauan, kun niihin kohdistuu valoa ja ovat siten riski koko sammutustyön ajan. Käytetyt valonheittimet tai, jopa katuvalot voivat aiheuttaa vaarallisia jän-

nitteitä. Rakennuksen katolle asennettuna aurinkosähköjärjestelmän lisäämä massa voi myös edesauttaa katon romahtamista. [2.]

Aurinkosähköteknologia kehittyy jatkuvasti ja siksi niihin liittyvien standardien ja määräysten tulisi seurata kehitystä. Mediassa on ollut monesti esillä aurinkosähkön turvallisuus, ja artikkeleissa painotetaan erityisesti ammattihenkilön tärkeyttä asennuksia tehdessä. Selkeitä olemassa olevia turvallisuusselvityksiä aurinkopaneeleiden tulipaloista ei ole, ja siksi kansainvälinen palo- ja pelastusalan järjestö CTIF onkin käynnistänyt aurinkopaneeleihin liittyvän turvallisuusohjeistuksen suunnittelun [3].

Aion esitellä työssä yleisesti aurinkosähköjärjestelmien teoriaa, yleisimpiä kokoonpanoja, sekä niitä koskevia olemassa olevia vaatimuksia ja suosituksia. Näiden lisäksi selvitän sähkön aiheuttamia paloja ja esittelen aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien palojen tilastoja Suomesta ja ulkomailta. Lähteinä työssä on käytetty muun muassa SFS 607-käskirjaa ja lukuisia verkkoaineistoja. Suomessa tilastot ovat peräisin pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO-järjestelmästä. Lopuksi työssä pohditaan tapoja tapaturmien minimoimiseksi suunnittelun, suojauksen ja ylläpidon avulla. Työn tuloksena saadut päätelmät ovat päteviä vain nykyisen tiedon valossa, tulevaisuudessa tilanne voi muuttua aurinkopaneeleiden kehityksen seurauksena.

Työn aihe on peräisin Paloässät Oy -nimiseltä yritykseltä. Paloässät on palotekniseen suunnittelun keskittynyt yritys Espoosta.

2 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkoenergia on uusiutuvista energiavaihtoehtoista tulevaisuuden kannalta ehkä kaikista lupaavin. Auringon tuottamaa säteilyenergiaa on Etelä-Suomessa ilmatieteen laitoksen mukaan noin 980 kWh/m² [4]. Tätä energiaa voidaan hyödyntää aurinkoenergiaa keräävillä järjestelmillä, sähkön ja/tai lämmön muodossa. Suomessa aurinkosähkön tuottaminen omaan käyttöön on sallittua 800 000 kWh:iin asti ilman siirtomaksuja tai sähköveroja. Suomen ilmastoon aurinkopaneelit sopivat erinomaisen hyvin, sillä paneelit tuottavat paremmin sähköä viileämissä olosuhteissa. Vaikka talvisin aurinko ei paljoa paista, on nykyään jo mahdollista saada kohtalaista tuottoa suurimman osan vuodesta. Ilmastolla on tosin myös haittapuolensa ja mahdolliset suuret lämpötilan

vaihtelut, sekä jää ja lumi vaativat veronsa laitteilta, joiden on tarkoitus toimia vuosikymmeniä ulkona säiden armoilla. [5.]

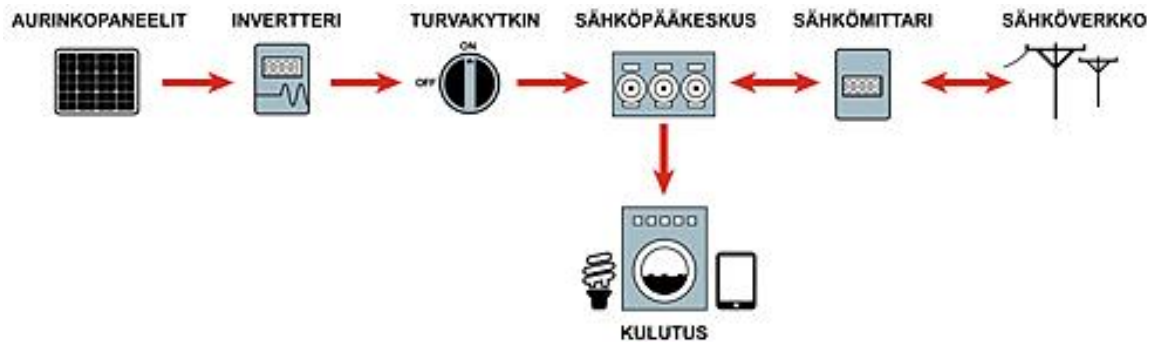
Rakennuksiin integroitavat tai niiden yhteyteen asennettavat BIPV- ja BAPV järjestelmät ovat aurinkosähköjärjestelmien tulevaisuuden kehityssuunta [6]. Sähköautoilun ja smartgrid-toimintojen lisääntyessä esimerkiksi kuvan 1, kaltainen ratkaisu tulee lisäämään suosiotaan. Naps -autokatos on valmis pakettiratkaisu, joka sisältää kaiken tarvittavan ja tuottaa vaihtosähköä auton lataamiseen tai suoraan sähköverkkoon [7]. Suomessa rakennuksiin integroitaville järjestelmille rajoituksena on 1000 V DC. Sitä suurempia laitteistoja ei saa asentaa rakennusten yhteyteen [8].



Kuva 1. Naps Autokatos [7].

Rakenteisiin lisätyt aurinkopaneelit voivat muodostaa ongelman, koska sähköjärjestelmien tapauksessa suunnittelussa ja asennuksessa keskitytään yleensä parhaaseen hyötysuhteeseen ja järjestelmän paloturvallisuus jää vähemmälle huomiolle [6].

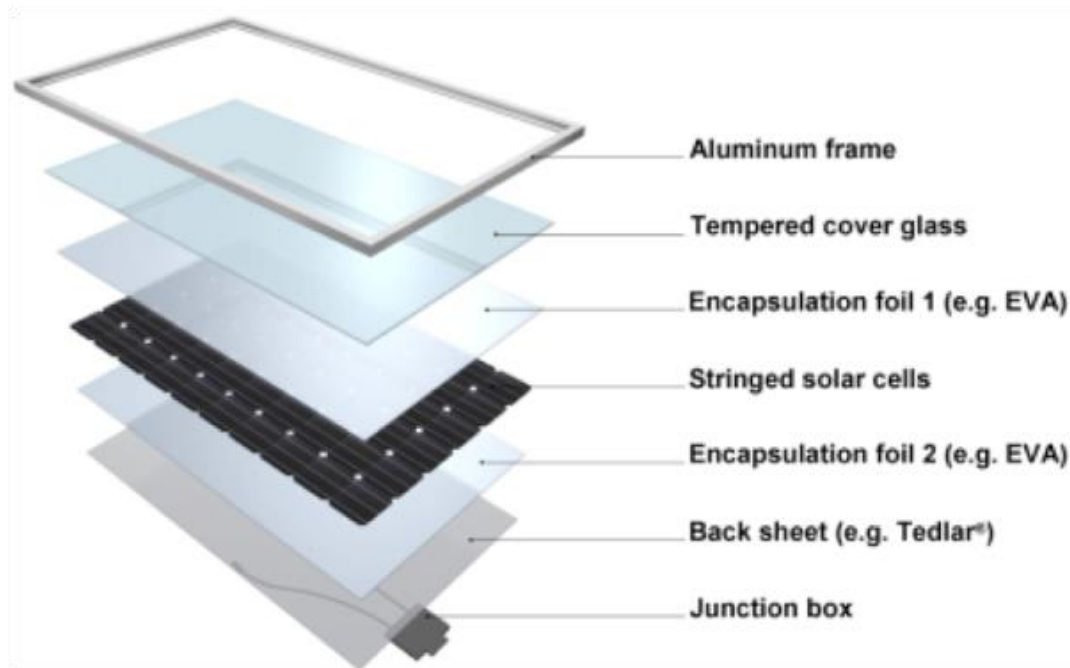
Aurinkosähköjärjestelmiä on saatavilla verkkoon liitettyinä On-Grid -järjestelminä ja verkkoon liittämättöminä Off-Grid -järjestelminä. Off-grid -järjestelmiä käytetään yleisesti kesämökillä tai muissa ulkorakennuksissa, joissa ei ole sähköverkkoyhteyttä. Yksinkertainen verkkoon liitetty On-grid aurinkosähköjärjestelmä sisältää kuvan 2, mukaisesti aurinkopaneelit, vaihtosuuntaajan eli invertterin ja turvakytkimen. Nämä yhdistetään sopivilla kaapeleilla ja liitäntärasioilla. Lisäksi järjestelmä voi sisältää akuston sähkönvarastointia varten. [9.]



Kuva 2. Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä [9].

Aurinkosähkön toiminta perustuu säteilyenergian muuttamiseen sähköiseen muotoon valosähköisen ilmiön kautta. Valosähköisessä ilmiössä auringonsäteilyn fotonien energia absorboituu törmäyksen johdosta atomeihin. Tämän energian ollessa tarpeeksi suuri fotoni saa atomista irrotettua elektronin. Aurinkokennot ovat levyjä, joihin on luotu puolijohteista valmistettuja vyöhykkeitä. Toinen puoli on sähkövaraukseltaan negatiivisesti seostettu ja sitä kutsutaan N -puoleksi. Toiselle puolelle seostetaan positiivinen P -puoli ja yhdessä ne muodostavat P-N -liitoksen. Positiivisen puolen "aukot" vetävät puoleensa negatiivisen puolen elektroneja, jolloin niiden välille syntyy sähkökenttä. Liittämällä kennoja sarjaan voidaan luoda kennosto halutun suuruisella jännitteellä. Rinnan kytketyt kennot puolestaan lisäävät oikosulkuvirran määrää. Kennosto muutetaan paneeliksi asentamalla se kehikkoon ja päällystämällä se halutulla materiaalilla fyysisen kestävyuden lisäämiseksi tai muiden ulkonäöllisten, tai toiminnallisten seikkojen takia. Valmiita paneeleita liitetään yhteen paneeliston luomiseksi. [10.]

Tyypillinen piikidepohjaisen aurinkopaneelin kokoonpano on esitetty kuvassa 3, Paneelin etulevy on lasia tai muovia ja sen alla aurinkokennosto on EVA (Etyleeni-Vinyyli Asetaatti) -kapselointi folioiden välissä. Takalevynä on muovia tai uusien kaksoislasi-paneelien tapauksessa molemmat etu-, sekä takalevy ovat lasia. Kehikko on usein alumiinia tai muovia. [11.]



Kuva 3. Aurinkopaneelin kokoonpano [11].

2.1 Paneelityypit ja rakenne

Itse aurinkopaneeli on keskeisin osa aurinkosähköjärjestelmää. Suurin määrä paneeleita valmistetaan Kiinassa, noin 70 % koko maailman tuotannosta. Kuluttajan kannalta aurinkopaneeleita tarkastellessa tärkeimmät ominaisuudet ovat hyötysuhde, sekä hinta per watti, € / W. Paneelien kehitys on ollut tasaista, ja niiden teho per neliometri, W / m², paranee jatkuvasti ja sen mukana myös hyötysuhde. Aurinkopaneelien hyötysuhde lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti. Paneelin nimellisteho jaetaan sen pinta-alalla ja kerrotaan standardiolosuhteiden säteilyteholla, joka on 1000 W/m². [12.]

$$\eta = W_p / AS$$

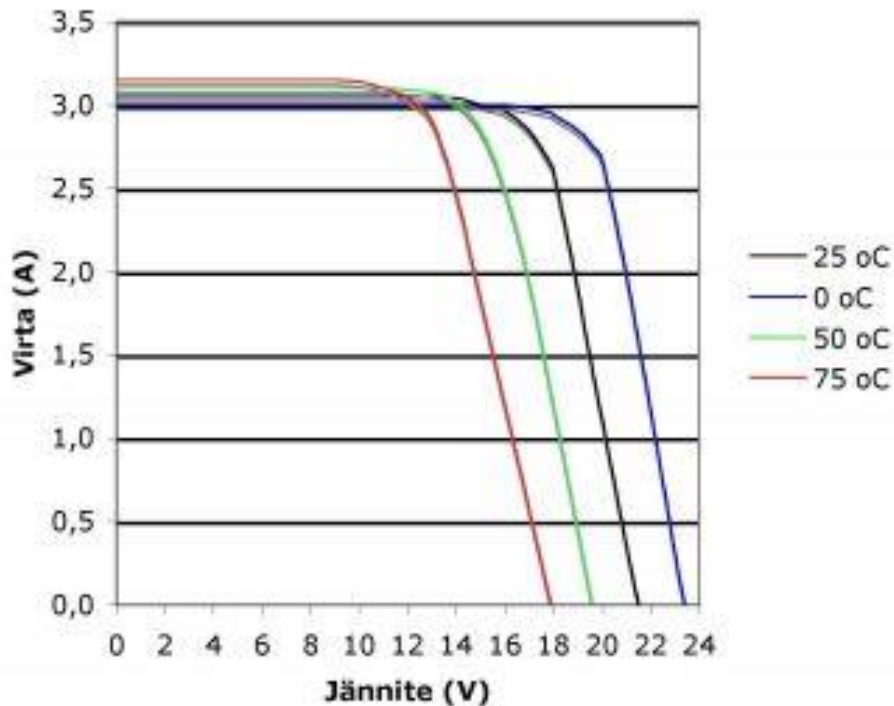
η on hyötysuhde

W_p on nimellisteho

A on pinta-ala

S on säteilyteho.

Hinnan ja tehon lisäksi aurinkopaneelia valittaessa tulee pohtia monia muita seikkoja, kuten paneelin sähköisiä ominaisuuksia ja niiden käyttäytymistä lämpötilan mukaan. Piikidepohjaisen aurinkopaneelin virta-jänniteriippuvuus on esitetty kuvassa 4. Käyristä näkee tyypillisen lämpötilan nousun aiheuttaman jännitteen putoamisen.



Kuva 4. Lämpötilan vaikutus paneelin jännitteeseen [10].

Muita tärkeitä asioita, joita tulee harkita ovat paneelin mekaaninen kestävyys (mm. tuulikuorma ja lumikuorma), paino ja fyysinen koko, käytetyt liittimet ja johtimien pituus, paneelin standardien mukaisuus, takuut, valmistusmaa ja ulkonäkö. Tyypillisiä aurinkopaneelista esitettäviä tietoja on listattu alla. [11.]

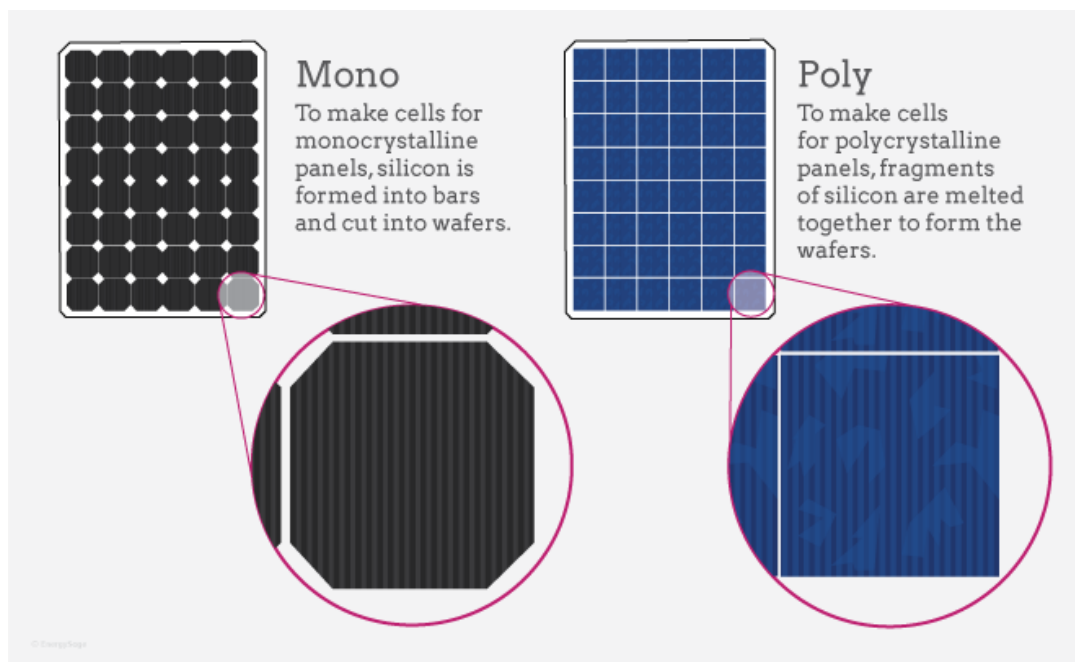
- Paneelin tyyppi: yksikide- tai monikide piipaneeli, ohutkalvopaneeli
- Huipputeho: 220-270 W
- Tehotoleranssin esitystapa: 0/+5 tai ± 3 W
- Tehotakuu: 90% 10 vuotta ja 80% 25 vuotta, lineaarinen 25 vuotta
- Koko: 1650 x 1000 x 40 mm
- Paino: 20 kg
- Lumikuorman kestävyys: 5400 Pa (noin 550 kg / m²)
- Tuulikuorman kestävyys: 2400 Pa
- Liittimet: MC4, Tyco (Solarlok), ym.

Aurinkopaneelien rakenteen kelpoisuutta määrittelee standardi IEC 61215 ja turvallisuutta IEC 61730. Euroopassa myytävien tuotteiden tulee täyttää yllä olevien standardien vaatimukset. Standardien täyttymisen voi varmistaa laitteessa olevasta CE-merkinnästä. Valmistajan lupaamien vakuutusten lisäksi laitteen turvallisuuden voi tar-

kistaa TÜV Rheinlandin verkkopalvelusta. TÜV Rheinland on kolmannen osapuolen asiantuntija, joka suorittaa laaduntarkastusta ja myöntää tuotteille CE-sertifikaatin. [12.]

Aurinkopaneelien palokäyttäytymiselle on omat testinsä, jotka ovat amerikkalaisen ANSI/UL 790-standardin mukaisia. Testi sisältää palavan kappaleen testin, jossa mitataan paneelin palonkestoisuutta palavan kappaleen alla, sekä palon leviämisen testin. Palon leviämisen testissä aurinkopaneeliin kohdistetaan vakiotehoinen liekki ja mitataan aikaa, jonka paneeli kestää levittämättä paloa. Testien perusteella paneelit luokitellaan A-, B- ja C-luokkiin. [13.]

Aurinkopaneelikennot ovat jaettu karkeasti kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven perinteiset aurinkokennot ovat valmistettu piistä. Yleisimmät paneelit ovatkin tyypiltään pii-kiteistä valmistetut mono- eli yksikide tai poly- eli monikidepaneeleita. Kuvassa 5 on esitetty näiden paneelirakenteiden ulkonäköä. Yksikidepaneeleit ovat usein mustanvärisiä ja monikidepaneeleit sinertäviä.



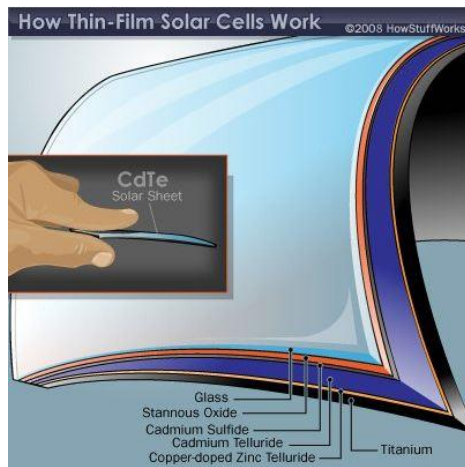
Kuva 5. Yksi- ja monikidepaneeleit [14].

Yksikidepaneeleit ovat nimensä mukaan valmistettuja yhdestä pii-kristallista. Hyötysuhteeltaan yksikristallikidepaneeleit ovat hyviä, mutta niiden valmistus on hankalampaa ja siten hinta korkeampi. Yksikidepaneeleille on tyypillistä yli 50 asteen lämpötiloissa niistä saatavan jännitteen laskeminen 12-15 %. Yksikidepaneeleita on käytetty jo 1970-luvulta ja silloin asennettuja paneeleita on vielä käytössä. Esimerkiksi avaruusaluksissa

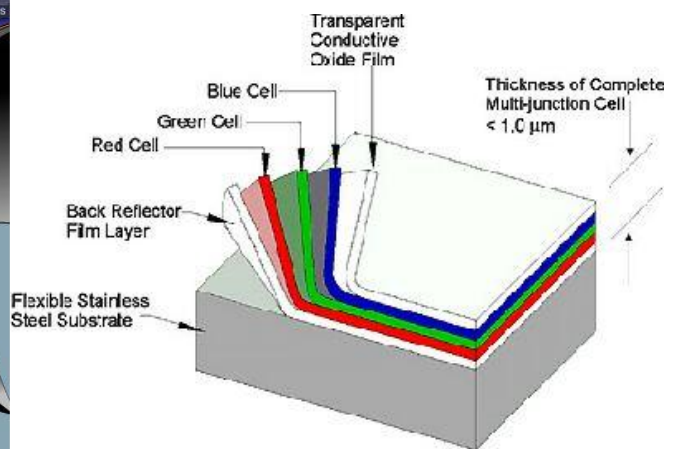
on käytetty yksikideaurinkopaneeleita [15]. Monikidepaneelit ovat kasvattaneet suosioaan edullisemmän hintansa ansiosta. Monikidepaneelit valmistetaan muodostamalla kristalleja sulatettuun pihin ja asettamalla se muottiin. Helpomman valmistusprosessin ansiosta monikidepaneelien hinta on halvempi kuin yksikidepaneelilla, hyötysuhde jää tosin alhaisemmaksi. [14.]

Toisen sukupolven kennoiksi kutsutaan ohutkalvokennoja ja moniliitoskennoja. Ohutkalvokennot ovat taipuisia paneeleita, jotka ovat valmistettu lasi tai metallilevyn päälle höyrytetystä ohuesta kerroksesta valoherkkää ainetta. [15.]

a-Si (amorphous silicon) on piipohjainen kenno, joka yksinkertaisimmillaan sisältää kerroksen negatiivista N-tyyppin piikalvoa ja kerroksen positiivista P-tyyppin kalvoa. Sellaisenaan paneelit eivät kestä hyvin auringonvalossa, joten stabiilisuuden lisäämiseksi kalvoista tehdään mahdollisimman ohuita, jolloin kuitenkin hyötysuhde laskee. Ohutkalvopaneeleita on käytetty jo pitkään esimerkiksi taskulaskimissa.



Kuva 6. CdTe -kenno [15].



Kuva 7. Kolmikerroksinen a-Si -kenno [15].

Muita ohutkalvokennoja ovat CdTE (kadmium telluridi) (kuva 6.) ja CIGS (kupari indium gallium diselenidi). Kadmium-telluridi-kennot ovat halpoja valmistaa, mutta varjopuolelta niissä on heikompi hyötysuhde ja niiden sisältämä myrkyllinen kadmium. Moniliitoskennoissa ohutkalvoteknologiaa on kehitetty hyötysuhteen parantamiseksi, lisäämällä niihin kalvoja. Esimerkiksi kuvan 7, kolmikerroksinen a-Si-kenno, jossa ohutkalvon päälle on kasvatettu lisää kerroksia, ja siten se pystyy hyödyntämään auringon koko

spektrin. Kolmannen sukupolven nanokide- ja orgaaniset kennot ovat vasta tulossa markkinoille. [15.]

Uusista rakennuksiin integroitavista ratkaisuista mainittakoon läpinäkyvät aurinkopaneeli-ikkunat, aurinkopaneelikattotiilet sekä erilaiset ohutkalvokennoihin perustuvat julkisivuun täydellisesti sulautuvat ratkaisut.

2.2 Invertterit

Aurinkosähköjärjestelmään tarvitaan invertteri eli vaihtosuuntaaja, jotta auringosta tuotettua sähköä voidaan käyttää verkkovirralla toimivilla laitteilla. Yksinkertainen vaihtosuuntaaja muuttaa tasavirran transistorien avulla kanttiaalloksi, joka puolestaan muutetaan muuntajalla tarvittavan taajuiseksi ja suuruiseksi vaihtojännitteeksi. Off-grid-järjestelmissä aurinkopaneeleita voidaan myös käyttää ilman invertteriä pelkän lataussäätimen kanssa akkujen lataamiseen tasavirralla tai tasavirralla toimivien laitteiden kanssa. Mitoitukseltaan aurinkosähköjärjestelmissä vaihtosuuntaaja tulisi olla koko järjestelmän nimellistehon mukainen. Yleisesti alle 3 kWp:n järjestelmiin valitaan 1-vaiheinen invertteri ja yli 3kWp:n järjestelmiin 3-vaiheinen. [9.]

Usein aurinkosähköjärjestelmän pakolliset suojauslaitteet ja tasavirtapiirin suojakytkin ovat integroituina invertterissä. Suomessa verkkoon kytkettävien aurinkosähköinvertteerien tulee täyttää turvallisuutta koskevien standardien IEC 62109-1 ja IEC 62019-2 vaatimukset paneeliston aiheuttamien vikavirtojen takia. [8.]

Maksimitehopisteen seuranta, eli MPPT (maximum power point tracking) on tärkeä ominaisuus aurinkopaneelien kanssa toimivassa invertterissä. Aurinkopaneeleista saatava jännite vaihtelee usein, ja suurimman hyötysuhteen paneelistoista saa, kun ne toimivat maksimitehopisteessään. MPPT:n idea on muuttaa aurinkopaneelistoista tuleva jännite maksimitehopistettä vastaavaksi kaikissa tilanteissa. [9.]

Invertteriksi voidaan valita perinteisen muuntajan sisältävän invertterin lisäksi muuntajaton invertteri. Muuntajattomassa invertterissä tasajännitettä muutetaan vaihtojännitteeksi puhtaasti tehoelektronikan ja mikroprosessorin avulla. Hyviä puolia muuntajattomassa invertterissä ovat halvempi hinta ja vähäisempi lämmön tuotto. Lisäksi muuntajattomassa invertterissä voi olla useita MPPT lähtöjä ja siten siihen voidaan kytkeä

aurinkopaneelistoja eri tehontuotoilla. Huonoja puolia ovat sähköisen eristyksen puuttuminen DC- ja AC-puolen välillä sekä maadoitus ja ukkossuojauksen monimutkaistuminen. [16.]

Aurinkosähköjärjestelmissä käytettäviä inverttereitä ovat ketjuinvertteri, keskusinvertteri tai mikroinvertteri.

Ketjuinvertteri eli stringinvertteri on yleisimmin käytetty invertterityyppi. Ketjuinvertteri sopii kaikkiin aurinkosähköjärjestelmiin. Yhteen ketjuinvertteriin voi sen mitoituksen mukaisesti kytkeä haluttu määrä aurinkopaneeleita. Yhden MPPT:n sisältävällä ketjuinverttereillä tuotetut ratkaisut vaativat eri tehontuotolla oleville paneeliketjuille omat invertterit. [17.]

Mikroinvertterit ovat pieniä vaihtosuuntaajia, jotka voivat olla asennettuna suoraan aurinkopaneeliin. Koko paneelistossa siis jokaisella aurinkopaneelilla on oma vaihtosuuntaajansa. Vaihtosuuntaajien asentaminen suoraan paneeliin vähentää DC-puolen kaapeloinnin määrää ja parantaa järjestelmän turvallisuutta. Myös jokaisessa paneelissa oleva invertteri mahdollistaa järjestelmän seurannan paneeleittain. Ratkaisu on myös parempi paneelien vikatilanteessa, sillä muut paneelit voivat jatkaa toimintaansa, vaikka yksi hajoaisi. [17.]

Isoja keskusinverttereitä käytetään kuten stringinverttereitä, mutta suuremmissa järjestelmissä. Lähinnä voimalakäyttöön suunnitellut invertterit toimivat jopa 1 MW:in tehoille saakka. [17.]

2.3 Asennusrakenteet

Aurinkopaneeleita asentaessa tulee ottaa huomioon suuntaus ja kallistuskulma. Pohjoisella pallonpuoliskolla suuntaus etelään on paras mahdollinen, sillä korkeimmillaan aurinko säteilee etelästä päin. Kallistuskulman merkitys on suurempi ja tehontuoton optimoimiseksi tulisi asennus suorittaa vuodenajasta riippuen auringon korkeuden suhteen. Suomessa kallistuskulmat 30 - 90 asteen välillä. Helsingin seudulla paras asennuskulma olisi 40 astetta. Usein kuitenkin kattoasennuksen tapauksessa on kustannustehokkainta tehdä asennus katon mukaisesti. Paneelit tulisi asentaa, siten että niihin ei kohdistu varjoja milloinkaan päivän aikana esimerkiksi savupiipuista tai ilmastointika-

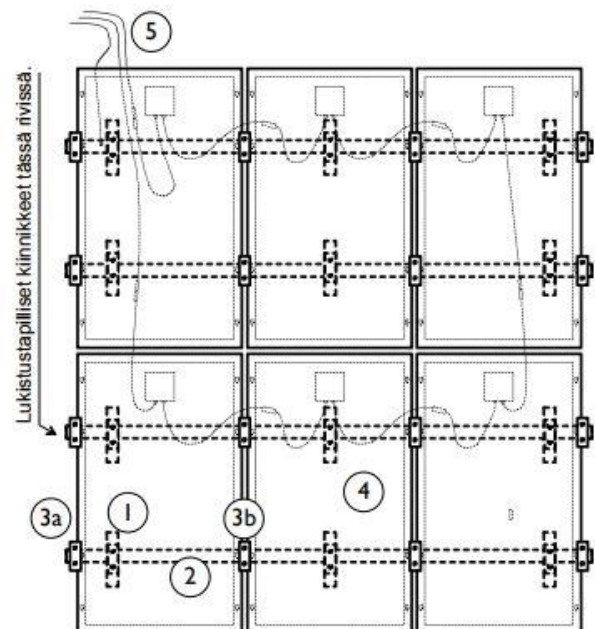
navista. Vaihtosuuntaajasta riippuen, jos järjestelmässä on vain yksi MPPT tulisi kaikki paneelit asentaa samansuuntaisesti. [18.] Paneelien asennuksessa voidaan myös käyttää auringonseuraajalaitteistoa. Maksimaalisen tehontuotannon saavuttamiseksi laite ohjaa paneeleita optimaaliseen kulmaan auringon suunnan mukaan. Tehon lisäys voi olla 10 - 25 % kiinteään asentukseen verrattuna [19].

Asennustelineet voivat joutua olemaan säiden armoilla vuosikymmeniä, joten niissä tulisi kiinnittää erityistä huomiota valmistusmateriaaliin ja kiinnitysten kestävyys. Paneelitojen välille tulisi jättää tilaa huoltokäytävälle ja ilmanvaihdon parantamiseksi. Kattoon kiinni asennettavat paneelit kiinnitetään kiinnikkeillä, joilla paneelin alle jää tilaa jäähdytysilmalle. [18.] Kuvassa 8 on esitetty paneeliston kiinnitys kattorakenteeseen.

Asennusrakenteiden lisäksi järjestelmään pitää valita tasajännitekaapelit, syöttökaapelit, turvakytin ja liitännätarasiat. Näiden valinnoista tarkemmin suositukset ja säädökset luvussa.

Asennuksen osat

1. Kattokiinnikkeet
kts. eri kiinniketyypit jäljempänä
2. Asennusputket
Putket
Supistusjatkoholkkit
3. Paneelikiinnikkeet
3a) Reunakiinnikkeet
3b) Jatkokiinnikkeet
Lukitustapit
4. Aurinkopaneelit
DC johdotus
potentiaalintasaus
5. Johdotus



Kuva 8. Aurinkopaneelin asennusohje [18].

2.4 Varastointi

Aurinkosähköjärjestelmät tuottavat sähköä vain valoisaan aikaan, joten sähkön varastointi myöhempää käyttöä varten on olennainen osa etenkin off-grid järjestelmien toimintaa. Akkujen lataamiseksi järjestelmään tarvitaan latauksen säädin. Latauksen säätimen tehtävä on estää yllilataus ja vuotovirrat akustosta takaisin paneeleihin. Lataussäätimien mitoitus tehdään akkujen jännitteen ja paneeliston maksimivirran mukaisesti. Tyypillisesti käytetyt akkujärjestelmät ovat kooltaan 50 - 500 Ah. [20.]

Taulukossa 1, on esitetty eri akku- ja muiden varastointitekniikoiden suuntaa antavia hankintakustannuksia, joiden hinnat ovat hieman laskeneet viime vuosina.

Akustoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä tulee aina olla asennettuna vikavirtasuojaus, jonka sijainti on akun ja latauslaitteen välillä. Suojaus toimii myös paneeliston kaapeleiden ylivirtasuojana. Estodiodia voidaan käyttää akkujen kanssa estämään yö-aikaan virran vuotamisen akuista takaisin paneeliston. [8.]

Taulukko 1. Akkujen hankintakustannuksia [21].

Teknologia	Energiavaraston hankintakustannukset (€/kWh *)	Liitännän teho-elektroniikan kustannukset (€/kW *)	Asennuksen ja liitännän oheiskustannukset (€/kW *)	Järjestelmäkoko soveltuvuus
Lyijyakut	94	110	31	pieni
Suljetut lyijyakut	125	110	31	pieni, keskisuuri
ZnBr akut	251	110	0	
NaS akut	157	94	0	pieni (vain ZEBRA), keskisuuri, suuri
Litium-ioniakut	314	110	19	pieni, keskisuuri, suuri
Vanadium-redox	220	110	31	keskisuuri
CAES säiliömalli	75	345	31	keskisuuri, suuri
Nopeat vauhtipyörät	627	188	0	nopeat lyhytaikaiset: pieni, keskisuuri
Hitaat vauhtipyörät	238	176	0	nopeat lyhytaikaiset: pieni, keskisuuri
Polttokenno	10	940	0	kaiken kokoiset
Elektrolyysi polttokennon lisänä	0	190	0	kaiken kokoiset

*) muunnettu \$→€ vuoden 2008 vaihtokurssin mukaan.

3 Standardit ja suositukset

Suomessa aurinkosähköjärjestelmiä koskevat standardit ja suositukset on kerätty käsikirjaan SFS 607. Käsikirja on julkaistu vuonna 2015 ja se sisältää yleisen suunniteluohjeistuksen lisäksi standardit SFS 6000-7-712 Valosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät, SFS-EN 62446 Sähköverkkoon kytketyt valosähköiset järjestelmät. Minimivaatimukset järjestelmän dokumentaatiolle, käyttöönototesteille ja tarkastuksille, SFS-EN 61724 Valosähköisen järjestelmän suorituskyvyn valvonta. Ohjeita mittauksiin, datan siirtoon ja analysointiin, SFS-EN 50438 Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille [8]. Järjestelmien nopean kehityksen takia suositusten ja määräysten olisi hyvä pysyä ajan tasalla.

IEC:n aurinkosähkötyöryhmä IEC TC 82 valmistelee kansainvälisiä standardeja koskien aurinkosähköjärjestelmiä. Esimerkiksi rakennuksien katto- ja seinärakenteisiin integroitavien paneelien standardit ovat työn alla. Monessa tapauksessa muita määräyksiä ei ole ja käyttäjiä kehoitetaan noudattamaan valmistajan ohjeistusta. [22.]

IEC-standardi koskien aurinkosähköjärjestelmän kaapeleita on myös valmisteilla. Ennen kyseisen standardin käyttöönottoa tullaan käyttämään valmistajien suosittelemia, tai standardien UL 4703 ja VDE-AR-E 2283-4 mukaisia kaapeleita [8]. Seuraavissa kappaleissa on listattu SFS 607 -käsikirjassa esitetyt suositukset ja vaatimukset.

Kaapelit, kytkinlaitteet ja asennus

Tasasähkökaapelit tulisi mitoittaa huomioiden ylikuormitussuojan mitoitus ja prospektiiviset vikavirrat. Lisäksi huomioidaan jännitteenalenema, joka ei saisi olla yli 3% kauimmaisen paneelin ja sovelluspiirin liittimien välillä. Kuormitettavuutta laskettaessa huomioidaan SFS 6000 mukaiset asennustapaan ja sijaintiin liittyvät kertoimet. [8.]

Aurinkopaneeleissa käytettävissä kaapeleissa huomioitavia asioita ovat niiden soveltuvuus tasasähkösovelluksiin, lämpötilan kestoisuus, käyttöikä, kestävyys ja taipuisuus. Lisäksi paneelihin kosketuksissa tai sen lähelle asennettava kaapeli tulee olla vedenkestoinen, UV-suojattu, ympäristön olosuhteita kestävä mm. suolapitoisuutta rannikolla tai saaristossa ja IEC 60332-1-2 mukaisesti palonkestoinen. DVC-A järjestelmissä johdinten tulisi olla joko kaksoiseristettyjä tai suojatusti asennettuja. Tasa- ja vaihtovirtajärjestelmät tulee erottaa selkeillä merkinnöillä tai käyttämällä värikoodausta. [8.]

Asennus tulisi suorittaa siten, että johdinsilmukat olisivat mahdollisimman pieniä. Paneelien välinen johdotus tulisi suojata putkilla tai muulla vastaavalla ja suorittaa vedonpoisto liitäntöjen irtoamisen estämiseksi. Kaapelit kytketään liitäntärasiaan, siten että rasian IP-luokitus säilyy. Aina kun paneelistossa tehdään toimenpiteitä, tulee kaikki liitännät tarkistaa. KytKentärasiat, jotka sisältävät ylivirtasuoja- tai tasakytkinlaitteita tulee olla sijoitettu siten, että niiden luokse pääsee helposti suorittamaan tarkastuksia ja kunnossapitoa. Lisäksi liitäntärasioiden tulee olla standardin IEC 60529 mukaisia ja IP-luokaltaan vähintään IP54, sekä UV-säteilyn kestäviä. [8.]

Aurinkosähköjärjestelmä tulee olla mahdollista erottaa sähköverkosta invertterin tasa- sekä vaihtosähköpuolelta kunnossapito- ja huoltotoimenpiteiden ajaksi. Kytkinlaitteiden tulee olla standardien mukaisia ja mitoitettuja katkaisemaan täysikuorma, sekä prospektiiviset vikavirrat. Jos invertterin erottamiseen tarvitaan useita erottimia, niitä on voitava samanaikaisesti ohjata, tai niiden tulee olla asennettuna samaan sijaintiin selkeästi merkittynä. Kytkimet jotka eivät pysty katkaista kuormaa merkitään ei kuorman katkaisuun ja pääsy niihin estetään. [8.]

Käytettyjen liittimien pitää olla standardin EN 50521 mukaisia, tasasähkökäyttöön soveltuvia ja ne tulee valita samalta valmistajalta. Jos liittimet ovat ulkokäytössä niiden pitää olla UV-kestävyydeltään ja IP-luokituksestaan siihen sopivia. Mitoitusjännitteeltään niiden pitää olla yhtä suuria tai suurempia kuin paneeliston määritetty suurin jännite. Niiden erottamiseen tarvitsee käyttää tietoisesti voimaa, eikä normaaleita kotitalouspistokkeita saa käyttää. [8.]

Suojaukset

Kaikissa akustoon kytketyissä järjestelmissä tulee toteuttaa ylivirtasuojaus. Muissa järjestelmissä paneeliketjun oikosulkuvirran ylittäessä IEC 61730-2:n mukaisen paneelin suurimman ylivirtasuojauksen on ylivirtasuojaus toteutettava. Osapaneelistojen ylivirtasuojaus toteutetaan, jos osapaneelista on enemmän kuin kaksi kytketty yhteen invertteriin. Valittujen ylivirtasuojalaitteiden tulee kestää kahden tunnin ajan laitteen mitoitusvirran 135% ylitystä. [8.]

Paneeliketjujen ylivirtasuojaus mitoitetaan siten, että mitoitusvirralle I_n pätee alla oleva kaava.

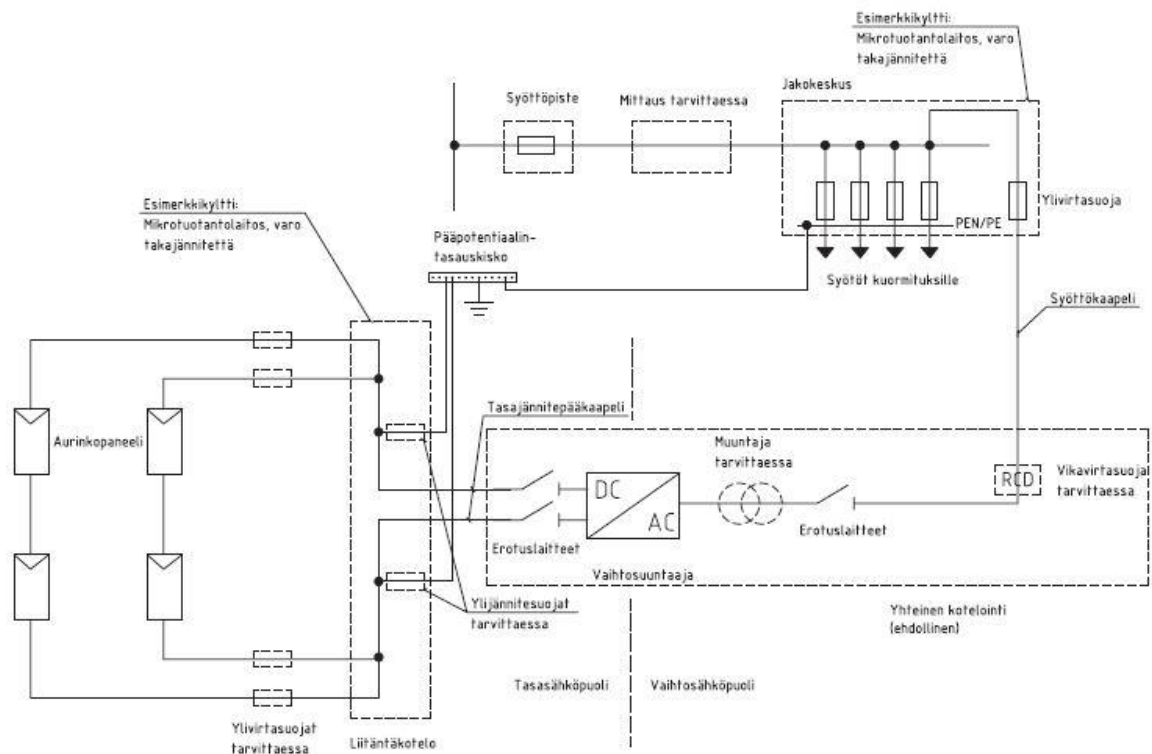
$$1,5 * I_{SC_MOD} < I_n < 2,4 * I_{SC_MOD}$$

I_n on ylivirtasuojan mitoitusvirta

I_{SC_MOD} on paneeliketjun tai paneelin oikosulkuvirta

Paneeliketjut voidaan myös ryhmittää rinnakkain yhden ylivirtasuojalaitteen taakse. Siinä tapauksessa mitoitusvirran I_n tulee olla suurempi kuin 1,5 kertaa paneeliketjujen lukumäärä kertaa I_{SC_MOD} . Mitoitusvirta ei kuitenkaan saa ylittää standardin mukaista paneelin suurinta ylivirtasuojasta.

Paneeliketjujen ylivirtasuojaus sijoitetaan liitäntärasiaan liittyvään kaapeliin. Koko paneeliston ylivirtasuojaus asennetaan kaapeliin, joka liittyy invertteriin. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki aurinkosähköjärjestelmän kytkentä, johon on merkitty ylivirtasuojien sijainnit. [8.]



Kuva 9. Aurinkosähköjärjestelmän suojeien sijainnit [23].

Paneeliketjuissa käytetyissä kaapeleissa ei vaadita ylikuormitussuojaa, jos ne on mitoitettu siten, että niiden jatkuva kuormitus on vähintään 1,25-kertainen paneeliketjun oikosulkuvirtaan verrattuna. [8.]

Ylijännitesuojaus toteutetaan tarpeen vaatiessa esim. salamasuojauksen mukana, standardin IEC 62305-3 mukaisesti. Ylijännitesuojan lisäksi muita tapoja ylijännitteen vaikutuksilta suojautumiseen ovat pitkien kaapeleiden asentaminen metalliseen asennusputkeen tai kanavaan. [8.]

Aurinkosähköjärjestelmän maadoitus tulee tehdä, jos järjestelmä on luokkaa DVC-A. Järjestelmälle rakennetaan maadoituskisko, joka on kytketty rakennuksen päämaadoituskiskoon. Maadoitusjohtimien minimi poikkipinta-alana on joko 6mm² tai 16mm² riippuen salamasuojauksesta. [8.]

Sähköverkkoon kytketyille aurinkosähköjärjestelmille on määritelty standardissa SFS-EN 62446 käyttöönottotestit, tarkastuskriteerit ja dokumentointi vaatimukset. Asennetusta järjestelmästä laaditaan perustiedot sisältävä ”arvokilpi” järjestelmän dokumenttiopaketin etusivulle. Verkkoon kytketty järjestelmä tulisi tarkastaa käyttöönottovaiheessa, aina kun siihen tehdään muutoksia, sekä säännöllisin väliajoin kunnossapito-tarkastusten muodossa. Tarkastukset suorittaa pätevä ammattihenkilö. [8.]

4 Sähköpalot

Sähköpaloiksi luokitellaan kaikki palot, joiden syttymisenergiana on sähkö jossain muodossa. Tyypillisesti sähköpalon aiheuttaa huono liitos tai johtimien hajoaminen, jonka seurauksena syntyy kipinöintiä tai vastusta, joka lämpenee. Pahimmassa tapauksessa vika aiheuttaa valokaaren ja tulipalon. [24, s. 662 - 664.]

Sähköpalojen syttyminen on usein riippuvainen ympäröivistä materiaaleista. Palon aikaansaamiseksi tarvitaan palavaa materiaalia polttoaineeksi. Sähkölaitteiden tapauksessa ympärillä on usein paloherkkää muovia tai puuta ja jopa alumiini voi syttyä. Alumiinin tapauksessa tarvitaan vähintään 480 V jännite ja tarpeeksi korkea oikosulkuvirta. [24, s. 662 – 664.]

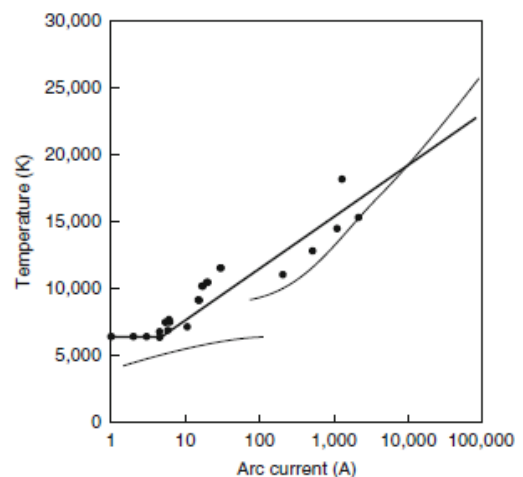
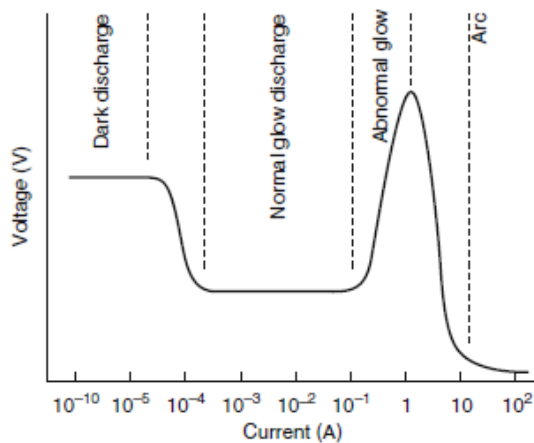
4.1 Sähköpurkaukset ja oikosulut

Valokaaret ja kipinöinti ovat yleisimmät sähköpalojen aiheuttajat. Valokaari syntyy, kun kahden elektrodin välille muodostunut sähkökenttä kasvaa riittävän suureksi, jolloin

sähkövirta voi purkautua sen läpi. Välissä oleva aine, usein ilma, ionisoituu voimakkaan kentän seurauksesta ja mahdollistaa johtavan kanavan syntymisen valokaarelle. [24, s 666 – 670.]

Sähköpurkauksen syntyminen eristetystä johtimesta toiseen johtimeen tai maahan tarvitsee eristekerroksen äkillisen hajoamisen. Tämän seurauksena eristeeseen syntyy johtava kanava. Öljy ja kaasu ovat hyviä eristeitä, koska ne ovat purkauksen jälkeen itsestään korjautuvia. Tosin esimerkiksi öljymuuntajassa öljy kestää vaan rajatun määrän läpilyöntejä. Kiinteät eristeet sen sijaan hajoavat eikä purkauksen polku korjaannu. [24, s. 670 – 681.]

Valokaaret aiheuttavat paineaallon purkautuessaan. Ne vaativat noin 0,1 A virran kanavan syntymiseen, jonka jälkeen virta kasvaa rajusti niin suureksi kuin virtapiiri antaa myöden. Kuvassa 10, on esitetty valokaaren virta-jännite-käyrä, josta nähdään jännitteen lasku ja virran lähes eksponentiaalinen nousu läpilyöntijännitteen ylittyessä. Normalissa paineessa valokaaret saavuttavat lämpötilan 6500-12000 K välillä, mahdollisesti jopa 50000 K asti, kuten kuvassa 11, on esitetty. Tulipalojen tapauksessa liekkien ionisoima kaasu on dielektrisesti heikompaa kuin ilma ja sen läpi syttyy valokaari helpommin. [24, s. 666 – 670.]



Kuva 10. Valokaaren virta-jännite-käyrä [24].

Kuva 11. Valokaaren virta-lämpötila-käyrä [24].

Tasasähkö eli DC-puolen valokaari on ongelmallinen, koska se ei sammuu, ellei virtalähdettä saada poistettua. Vaihtosähköllä taas sähkön aaltomaisen luonteen takia jännite saavuttaa arvon 0 taajuuden mukaisesti, jolloin valokaari sammuu. Kuitenkin yli

150 V jännitteillä valokaaren uudestaan syttyminen on todennäköistä. Yli 600 V jännitteillä valokaari laukaisee suojalaitteet melko nopeasti, eikä siten aiheuta niin suurta vaaraa. Vaarallisin jännitealue on siis 150 V – 600 V, jolloin valokaari ei sammu itsensä, eikä suojauslaitteet mahdollisesti toimi riittävän nopeasti. [24, s. 666 – 670.]

Oikosulun aiheuttaman ylikuormituksen seurauksena tulipalon syttyminen on epätodennäköistä, jos kaapeleiden mitoitus, asennus ja suojaus on tehty oikein. Virran tulisi olla 300 – 700 % mitoitettua virtaa suurempi riittävän lämpenemisen aikaansaamiseksi kaapeleissa syttymistä varten. Vanhemmilla kaapeleilla johtimen lämpölaajeneminen ja samalla eristeen kutistuminen voivat aiheuttaa eristeen hajoamisen, johdinmateriaalin pullahtamisen ulos ja siten oikosulun. Ylijännitteen aikaansaamaan paloon tarvitaan käytännössä salamanisku, väärän jännitteen syöttäminen piiriin, nollavika tai muusta syystä tapahtuva ylijännitepiikki. [24, s. 670 – 681.]

4.2 Sähköpalotilastoja

Tukes on teettänyt vuonna 2013 tutkimuksen Suomessa tapahtuneista sähköpaloista. Tutkimuksessa on otettu PRONTO-järjestelmästä vuosilta 2010, 2011 ja 2013 sähköön liittyvät palot. Rakennuspaloihin tai palovaaroihin liittyviä hälytystehtäviä oli kirjattu 5900, joista 2590:ssa oli sähkö energialähteenä. Tilastoissa on eritelty erikseen sähkölaitteet, kuten valaisimet ja kodinkoneet ja sähkölaitteistot, kuten sähkökaapeloinnit ja sähkökeskukset. [25.]

Taulukko 2. Sähköpalot, sähkölaitteet mukana [25].

Sijointus	Kone tai laite	kpl	%
1	Liesi tai uuni	1056	40,8
2	Valaisin	233	9,0
3	Muu kone tai laite kun ryhmästä on jätetty pois akut ja lataus, hissit, keskuspölynimurit ja liesituulettimet (67 kpl)	188	7,3
4	Kiuas	156	6,0
5	Sähkökeskus	128	4,9
6	Pyykinpesukone	95	3,7
7	Sähköjohdot ja -kaapeloinnit	83	3,2
8	Mikroaaltouuni	69	2,7
9	Tuotantoprosessissa käytetty kone tai laite	66	2,5
10	Kylmälaite	64	2,5
	Yhteensä	2138	82,6

Taulukko 5.6 Yleisimmät 10 syytä ja niiden prosentuaalinen jakautuma koko aineistosta, kun liesi on mukana

Taulukosta 2 nähdään, että ylivoimaisesti yleisin sähkölaite, jonka seurauksena tulipalo on syttynyt, on liesi. Sähkölaitteistoista alkaneiden palojen määrää on tilastoitu taulukossa 3. Sen mukaan lähes 40 % sähkölaitteistojen paloista on saanut alkunsa sähkökeskuksesta. Sähköjohdot ja -kaapeloinnit ovat seuraavana tilastoissa. [25.]

Taulukko 3. Sähköpalot, sähkölaitteistot [25].

Laitteiston osa	lkm	%
Sähkökeskus	128	38,9
Sähköjohdot ja -kaapeloinnit sis. jakorasiat (13)	96	29,2
Pistorasia tai -painike	51	15,5
Muu sähköverkoston osa	41	12,5
Sähkölämmitykset	13	4,0
Yhteensä	329	100

Taulukko 6.1.2 Sähkölaitteiston jako ryhmiin ja osuudet.

Aurinkosähköjärjestelmien luokittelu palon lähteenä on haasteellista, sillä aurinkosähköjärjestelmän osat voivat kuulua useampaan kategoriaan. Järjestelmän osia voisi luokitella esimerkiksi kohtiin johdot ja -kaapelointi, sähköverkon osa tai muu sähkölaite.

5 Aurinkosähköjärjestelmien palot

Aurinkosähköjärjestelmien paloja tarkastellessa tulisi aurinkosähköjärjestelmää pitää mahdollisena palon aiheuttajana, sekä myös usein paljon levittäjänä. Järjestelmän lähellä syttyneen tulipalon seurauksena voi paneelin sisältämä palava aines edesauttaa palon leviämistä, tai palon seurauksena vaurioitunut järjestelmä sytyttää uusia paloja. [26.]

Katolle asennettujen aurinkopaneelien vaikutus katon vaurioitumiseen voi olla jopa 20 kertaa korkeampi BIPV:n, kuin BAPV:n tapauksessa. Katolla sijaitsevan rakenteen eräs ongelma tulipalon sattuessa on niin sanottu savupiippu efekti, jossa paneeliston ja katon välillä on käytävä, josta palo saa happea, joka voimistaa sen lämpövuota. [26.]

Täysin metallisia rakenteita lukuun-ottamatta kaikki, jopa luokan A rakenteet ovat tulipalolle riskialttiita. Paneeleiden ulkolevy on usein lasinen ja kestää paloa melko hyvin, mutta takapuoli voi olla polyesteripohjaista levyä. Palojen seurauksena aurinkosähköjärjestelmä tuhoutuu, mikä voi aiheuttaa suurta taloudellista vahinkoa, itse järjestelmän hinnan takia, mutta myös menetetyt potentiaalisen tuotetun sähkön muodossa. [26.]

Palo todennäköisesti vahingoittaa ja voi jopa tuhota rakennuksen, sekä aiheuttaa ihmisille hengenvaaraa. Riippuen käytetyistä komponenteista on mahdollista, että palon seurauksena ilmaan vapautuu myrkyllisiä kaasuja. Etenkin vanhemmissa paneeleissa EVA eli etyleeni-vinyyliasetaatti pohjainen kalvo on yleinen. Se kuitenkin on voimakkaasti palavaa ja palaessa vapauttaa haitallisia kaasuja. [27.]

Aurinkosähköteknologian maine on vielä erittäin hyvä vähäisten onnettomuuksien takia. Jokainen tapaturma vahingoittaa aurinkosähköjärjestelmien mainetta erittäin turvalisena uusiutuvana energialähteenä. [26.]

5.1 Tilastot

Tilastoituja tapauksia aurinkosähköjärjestelmiin liittyvistä paloista on melko vähän. Suuntaa antavaa tietoa PV-järjestelmien onnettomuuksista saadaan PRONTO-järjestelmästä. PRONTO on pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastointi järjestelmä, johon on kirjattu kaikkien pelastuslaitosten pelastus- ja avunantotehtävät. PRONTO ollut käytössä vuodesta 1996 lähtien ja sinne on 4.9.2017 mennessä kirjattu 1 943 750 kpl tehtäviä. [29.]

Järjestelmän ongelmaksi osoittautuu tapahtumien kirjaamisen monimuotoisuus. Riippuen tapauksen kirjaajasta se voi sisältää tarkankin kuvauksen tilanteesta, mutta toisinaan kuvaus on erittäin suppea. Aurinkosähköjärjestelmän paloja tutkiessa voi olla vaikeaa kohdistaa yksittäinen palonlähde ja sen takia onnettomuustilastoista ei välttämättä saa kaikkea tietoa. Myös monet palot jäävät kirjaamatta aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien epäselvyyksien takia. [30.] PRONTO -järjestelmästä saadut tilastot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamat palot PRONTO-järjestelmästä [30].

	2013	2014	2015	2016	2017	Yht.
Tapausten lukumäärä	3	2	3	1	7	16

Järjestelmästä löytyi n. 100kpl tapauksia hakusanoilla AURINKO, SOLERER ja SOL-PAN. Näistä tapauksista 16kpl olivat selkeästi aurinkosähköön liittyviä.

Kirjattujen tapausten määrä on melko vähäinen, mutta selkeästi nousussa. Osittain se johtuu aurinkosähkön käytön nopeasta lisääntymisestä. Tapaukset vaihtelivat johdotuksen ja kaapeloinnin oikosuluista, aurinkosähköjärjestelmän akuston paloihin. Mukaan mahtui myös pienempien aurinkopaneeleilla toimivien akkukäyttöisten laitteiden aiheuttamia palotilanteita. Tilastoista voidaan todeta yleisimmiksi syttymisen aiheuttajiksi järjestelmien vikaantumiset, omatoimiset asennukset ja ylläpidon vajaavaisuuden. Lisäksi myös salama oli yhdessä tapauksessa palovaaran aiheuttajana. [30.]

Muista maista löydettyjen erilaisten tilastojen osalta Britanniassa on arvioitu sattuneen tapaturmia noin 1 per 100 000 asennusta, mikä tarkoittaa noin 9 paloa vuodessa (920 000 asennettua järjestelmää kohti) [26]. Italian pelastuslaitos on raportoinut 1600 tapausta 560 000 asennuksesta. [6]. Saksassa on arvioitu vuoden 2017 alkuun mennessä paloja aiheuttaneiden järjestelmien määräksi 0.006% kaikista asennuksista. [28]. Kuvassa 12, on Lontoossa 2017 heinäkuussa palanut rakennus, jonka palon lähteeksi epäillään aurinkopaneeleita.



Kuva 12. Aurinkopaneelit liekeissä [27].

5.2 Huomioita aurinkosähköjärjestelmien paloista

Pelastuslaitoksilla ja aurinkosähköjärjestelmien valmistajilla on huomioita liittyen aurinkosähköjärjestelmien suunnitteluun ja asennukseen, sekä sammutustoimenpiteisiin [2; 26.]

Suunnittelua ja asennusta koskien

Rakennuksiin integroitujen järjestelmien suunnittelussa tulee ottaa huomioon, etteivät ne häiritse savunpoiston ja ilmastoinnin järjestelyjä. Lisäksi vesikatolle asennettavien aurinkopaneelien ja kaapeleiden aiheuttama palokuorma pitää huomioida suunnittelussa. Palotilanteessa rakenteet voivat heikentyä ja järjestelmän vesikatolle lisäämä massa voi edesauttaa romahtamista. [2; 26]

Rakennukselle aiheutuvaa paloriskiä voidaan vähentää kaapeleiden ja aurinkosähköjärjestelmien riskialttiiden osien asentamisella palonkestoisesti palamattomissa kaapelihyllyissä tai kouruissa ja käyttäen palamatonta alustaa rakennuksen ja laitteiden välillä. Johdotukseen tulee kiinnittää huomiota sillä huonosti suunniteltu johdotus voi aiheuttaa kompastelua pelastushenkilöstölle. [2; 26]

Pelastustoimenpiteitä koskien

Palavien paneelien sammutuksessa tulee ottaa huomioon riittävä etäisyys vedellä sammuttaessa. Vaahtosammutus ei toimi, sillä se valuu paneeleista pois. Paneelit voivat myös vapauttaa haitallisia kaasuja palaessaan, joka tulee ottaa huomioon sammuttaessa. Kaksoislasipaneelit ovat hyvin palo kestäviä, mutta katolta pudotessa ne voivat särkyä ja lentävät sirpaleet aiheuttaa ongelmia. [2; 26.]

Vesikatolle asti rakennettavat kuivanousuputket, sekä paneelien erotuskytkimien asentaminen savunpoistonohjauskeskuksen ja paloilmottimen käyttölaitteen läheisyyteen helpottaisivat sammutustyötä. [2.]

Pelastuslaitokselle tulee toimittaa turvallisuusselvitys paneeleista, kun tuotetoimittaja on tiedossa ja suunnitelma valmistunut. Joissain tapauksissa sammutustyössä voidaan tarvita sähköalan ammattilaista. [2.]

6 Aurinkosähköjärjestelmien palojen syitä

Todennäköisimmät aurinkopaneelien syttymissyöt ovat valokaaret, oikosulut ja kuumat pisteet. Paneelien ja invertterien lisäksi, komponenttitasolla yleisimmät osat joista palot ovat saaneet alkunsa ovat DC-puolen liittimet, kaapelit ja erottimet. [26.]



Kuva 13. MC4-liittimet [31].

MC4 on yleisin liittintyyppi aurinkopaneelistoissa (kuva 13). Näille DC-liittimille on olemassa standardi IEC 625852, mutta markkinoilla on useita saman tyyppisiä liittimiä, joiden yhteensopivuudesta ei kuitenkaan ole testausdataa turvallisuuden varmistamiseksi. Huonosta liitännästä voi seurata vikatilanteita. Myös muut DC-puolen komponentit kuten kytkimet ovat aiheuttaneet paloja. [26.]

6.1 Valokaaret

Kahden johtimen tai johtimen ja maan välille syntyvä valokaari voi olla seurauksena väärin asennetusta tai vaurioituneesta järjestelmästä. Valokaaren syttymisen syynä voivat olla myös vialliset komponentit tai muu järjestelmän vikaantuminen, joka rikkoo eristeen. [32; 24.]

PV-järjestelmien aiheuttamat kattopalot ovat johtuneet usein valokaarista tasasähköpuolella kohdissa, joissa useiden paneelitojen johdotukset liitetään yhteen. Näissä kohdissa jännite on suurempi. Kuvassa 14 on aurinkosähköjärjestelmän tasasähköpuolella syttynyt valokaari usean johtimen ryhmässä. [32.]



Figure 6
PV Panel Arc Flash

Kuva 14. Valokaari aurinkopaneeliston DC-kaapeleissa [32].

Aurinkosähköjärjestelmissä esiintyvät valokaaret voivat olla kolmen tyyppisiä. Yleisin näistä on sarjavalokaari. Sarjavalokaaret aiheutuvat esimerkiksi viallisista liitännöistä tai johdinten katkeamisesta. Niiden sammuttaminen onnistuu yleensä poistamalla paneelistosta kuorma. Sarjavalokaari voi aiheuttaa muissa johtimissa rinnakkaisvalokaaren, jos sitä ei saada sammutettua riittävän nopeasti. Rinnakkaisvalokaari on vaarallisempi ja aiheutuu lähekkäisten, eri potentiaalissa, olevien johtimien osittaisesta oikosulusta. Lisäksi valokaaren voi aiheuttaa eristysvian seurauksena maan ja johtimen välille syntyvä maasulku. [8.]



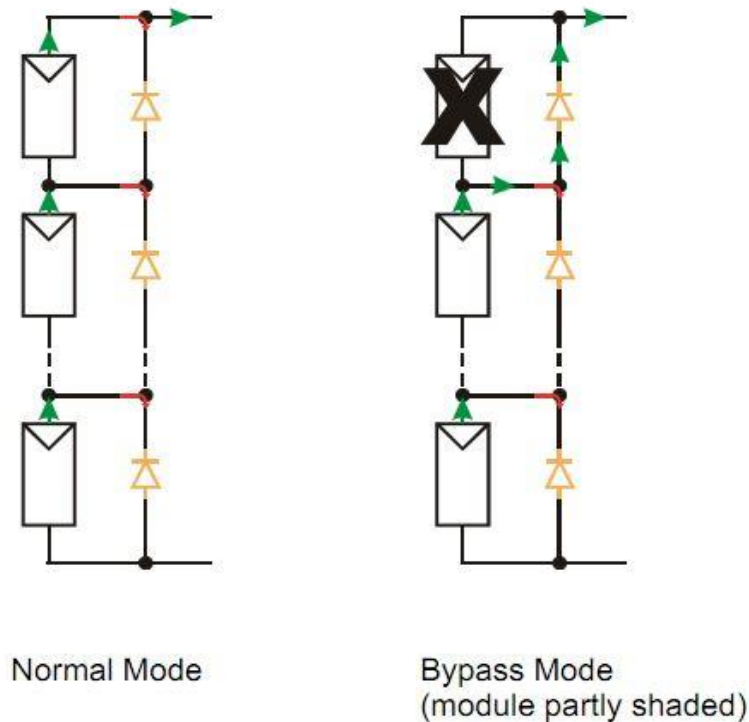
Figure 9
Arcing Caused by Penetration of PV Module

Kuva 15. Vaurion aiheuttama valokaari aurinkopaneelissa [32].

Valokaaren syntyminen aurinkopaneelin vahingoittumisen seurauksena on esitetty kuvassa 15. Esimerkiksi huolto- tai sammutustöiden aikana tapahtunut vahingollinen paneelin lävistäminen voi aiheuttaa paneeliketjussa valokaaren. [32.]

6.2 Kuumat pisteet

Kuumat pisteet ovat varjostuksen seurauksena paneeliketjussa heikoimman tehon tuottavan paneelin pinnalle syntyviä pisteitä, joissa lämpötila voi nousta korkeaksi. Varjostumattomat paneelit syöttävät tehoa varjostuneeseen paneeliin ja sen on muutettava se lämmöksi. Ohitusdiodin tarkoitus on ”ohittaa” varjostunut paneeli ja estää kuuman pisteen syntyminen (kuva 16) [33]. Diodit muuttuvat kuitenkin ongelmallisiksi salamaniskujen tai muiden jännitepiikkien seurauksena, jolloin ne voivat hajota. Ulkoisesti diodin toimintaa ei pysty tarkastamaan ja vaurioituneen diodin seurauksena voi kuuman pisteen syntyminen aiheuttaa paneelin syttymisen [26]. SFS 607 -käsikirjassa on määritelty ohitusdiodin käyttö pakolliseksi yli 50 V paneeleissa [8].



Kuva 16. Ohitusdiodin toiminta [33].

6.3 Pohdintaa palojen syistä

Tyypillistä näille kaikille tapaturmille ovat suunnittelu- ja asennusvirheet. Kuluttajat pyrkivät saamaan mahdollisimman edullisen aurinkosähköjärjestelmän eikä komponenttien laatuun tai tarkempaan suunnitteluun kiinnitetä huomiota. Myös asennus voidaan

tehdä itse viitsimättä hankkia paikalle ammattilaista, etenkin Off-grid-kesämökkiasennuksissa.

Aurinkopaneelien ”huolettomuudessa” ja pitkäikäisyydessä piilee myös riski. Paneelien ollessa ilman huoltoa tai tarkastuksia jopa vuosia kerrallaan ulkona elementtien armoilla on mahdollista, että paneelistoissa on tapahtunut vaurioita, jotka eivät ole vaikuttaneet paneelien toimintaan. Kuitenkin pahimmassa tapauksessa vauriot pahenevat ajan kanssa ja lopulta aiheuttavat tapaturman. Talvella pimeään aikaan tapahtunutta johtimien vaurioitumista on mahdoton huomata paneelin toiminnassa, mutta valoisaan aikaan voi siitä aiheutua esimerkiksi valokaari.

Lumi, pakkaset ja myrskyt voivat olla riskitekijä ympäri vuoden ulkona oleville laitteille. Asennuskulman takia katolla olevan paneelin taakse voi kerääntyä vettä, jäätä ja lunta. Ilmojen lämmitessä liikkuvat massat voivat vaurioittaa kaapeleita ja itse paneeleita, ellei niitä ole suojattu kunnolla. Myrskyjen lennättämät oksat myös voivat vahingoittaa paneeleita tai aiheuttaa oikosulkuja, joista pahimmassa tapauksessa seuraa tulipalo.



Kuva 17. Aurinkopaneeliston alle kerääntynyttä palavaa materiaalia [34].

Toinen ulkopuolinen tekijä ovat tuholaiset, kuten linnut ja jyrsijät. Paneelit voivat olla talon katolla asennettuna sopivasti pienille eläimille, tai jopa lintujen pesintää varten. Paneelin taakse kerääntyvä biologinen massa lehtiä ja risuja on hyvä sytytyksen lähde, ja vikatilanteessa voi syttyä helposti (kuva 17). Jyrsijöiden aiheuttamat sähköpalot ovat melko yleisiä ja niiltä suojautumiseksi on riskialttiissa paikoissa kaapelit syytä koteloida. Erityisesti rotat ja oravat saattavat nakertaa suojaamattomia kaapeleita (kuva 18). Pienet eläimet voivat myös päästä esimerkiksi sähkökaappeihin tai muuntajiin ja aiheuttaa ruumiillaan oikosulun. Sama tapaus voi toistua esimerkiksi invertterissä, liitäntärasiaassa tai aurinkopaneeliston alapinnalla DC -johdotuksien seassa. [34.]



Kuva 18. Jyrsitty kaapeli [33].

Arvokkaiden ja melko helposti vietävien aurinkosähköjärjestelmän osien varastaminen tai ilkivalta voivat myöskin olla mahdollisia tapaturman aiheuttajia. Esimerkiksi järjestelmästä viety paneeli tai johdon osa voivat jäädä huomaamatta, mutta kuitenkin jäljelle jäävä järjestelmä synnyttää tarpeeksi suuren jännitteen rakenteiden sytyttämiseen vikatilanteessa. Myös tapaturmariski kasvaa, jos jännitteellisiä johtimia jää roikkumaan suojaamattomana. [35.]

7 Vikatilanteiden havaitseminen

Aurinkosähköjärjestelmän vikaantumiset voivat usein alkaa pienestä viasta, kuten halkeamasta, joka ajan kanssa pahentuu ja aiheuttaa tapaturman. Erilaiset aurinkosähköjärjestelmän seurantaan tarkoitetut järjestelyt voivat olla tehokas tapa havaita viat ennen kuin ne aiheuttavat onnettomuuksia. Inverttereissä voi olla sisäänrakennettuna seuranta- ja monitorointia varten ominaisuuksia, mutta myös suoraan paneeleihin kytkettyjä järjestelmiä on olemassa. Monet niistä toimivat langattomasti internetin välityksellä, jolloin mahdollisista vikatilanteista saa tiedon missä tahansa (kuva 19). Reaaliajassa päivittyvä ja koko ajan nähtävillä oleva data järjestelmän tuottamasta energias- ta on hyvä tapa seurata järjestelmän kuntoa. [36.]



Kuva 19. Aurinkosähköjärjestelmän seuranta [36].

Verkkoon kytkemättömille järjestelmille ei vaadita erillisiä tarkastuksia [8]. Verkkoon kytketyille järjestelmille vaaditaan määräaika- ja välein suoritettavia tarkastuksia, mutta tarkastusvälejä ei ole tarkemmin määritelty. Usein paneeleille suositellaan puhdistamista valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti, mutta muita ylläpitoon liittyviä suosituksia etenkin verkkoon kytkemättömille laitteille ei ole. Järjestelmän turvallisen toiminnan takaamiseksi olisi kuitenkin suotavaa, että tarkastuksia ja huoltoa suoritettaisiin useammin ja parhaassa tapauksessa ammattilaisen suorittamana.

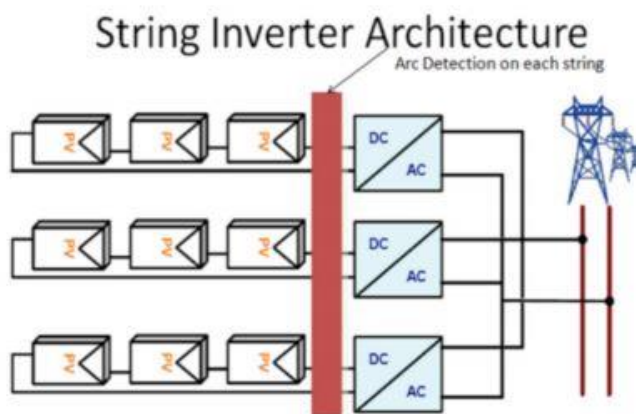
8 Järjestelmän suojaus

Tapaturmariskin minimoimiseksi aurinkosähköjärjestelmä tulisi suojata sähköisesti ja mekaanisesti kaikilta mahdollisilta tilanteilta.

8.1 Valokaarivikasuoja

Valokaarivikasuoja eli AFD, (arc fault detection device) on ollut jo vuosia pakollinen USA:ssa ja osassa Eurooppaa. Valokaarivikasuojan toiminta perustuu jatkuvaan sähkövirran ja jännitteen aaltomuotojen seurantaan. Aaltomuodossa tapahtunutta vaihtelua havaitessaan suoja aktivoituu ja katkaisee virtapiirin. Suojan toiminta perustuu erittäin nopeaan katkaisukykyyn. Valokaarivikasuojan käyttöä suositellaan sellaisiin tiloihin, joissa nukutaan, säilytetään helposti syttyviä materiaaleja, on käytetty palavia rakennusmateriaaleja, joissa on korvaamattoman arvokkaita esineitä, ja tietyissä palo-osastoissa. [37.]

Valokaarivikasuoja voi olla itsenäinen tai erillinen. Erillinen valokaarivikasuoja tarvitsee erillisen johdonsuojakatkaisijan, jolle se antaa laukaisukäskyn. Itsenäinen valokaarivikasuoja sisältää myös katkaisijan. [37.] Kuvassa 20, on esitetty valokaarivikasuojien asennus string-vaihtosuuntaajilla toteutetussa järjestelmässä. Valokaarivikasuoja tulisi sijoittaa jokaiseen paneeliketjuun DC puolelle. [38.]



Kuva 20. Valokaarivikasuojien sijainti [37].

8.2 Salamasuojaus

Ukkoselta suojautuminen on usein tarpeellista, jos pyritään minimoimaan kaikki sähkötapaturmien riskit. Katolla sijaitsevat paneelit eivät itsessään vedä salamoita puoleensa muuta rakennusta enemmän [8]. Aurinkosähköjärjestelmän johdotukset voivat kuitenkin olla pitkiä ja kulkea rakennuksen sisään useasta paikasta. Vaikka salama ei osuisi suoraan kohteeseen, voi se luoda voimakkaita sähkökenttiä, jotka indusoituvat pitkien johdin silmukoiden kautta aiheuttaen suuria jännitepiikkejä. Talon sähköverkkoon kytkeytyneinä ne voivat vahingoittaa myös kaikkia muita talon sähköisiä laitteita. Indusoituvien ylijännitteiden pienentämiseksi tulisi kaapelit asentaa muodostaen mahdollisimman pieni pinta-alaisia johdinsilmukoita, esimerkiksi asentamalla ne rinnakkain. [39, s. 364 - 374.]

Ulkoisen ukkossuojauksen tapauksessa (ukkosjohtimet) pitää aurinkopaneelien sijainti ottaa huomioon. Kattavan suojauksen lisäksi ukkosjohtimien ja paneelien välillä pitää olla riittävä etäisyys läpilyöntien estämiseksi, sekä jotta ukkosjohtimet eivät varjostaisi paneeleita. Kuvassa 21 on esitetty eri paksuisille ukkosjohtimille sopivat etäisyydet paneeleista niiden luoman varjon kannalta. [39, s. 364 – 374.]

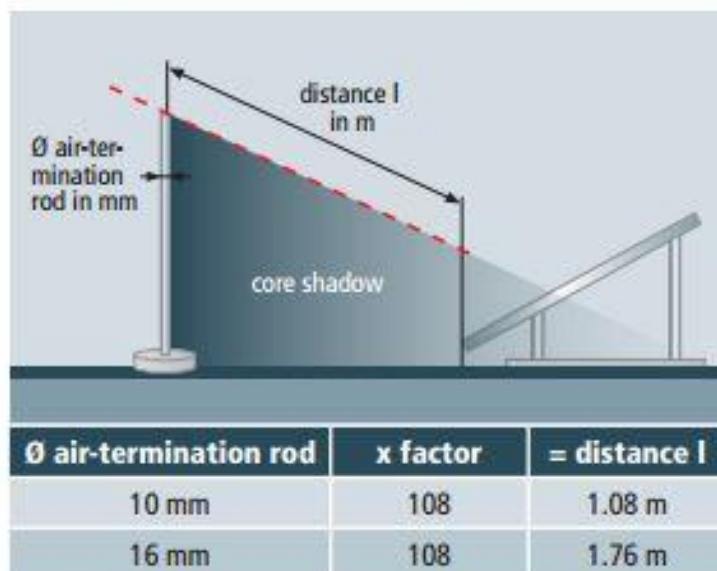


Figure 9.18.4 Distance between the module and the air-termination rod required to prevent core shadows

Kuva 21. Ukkosjohtimien ja aurinkopaneelien etäisyys [39].

Ylijännitesuojat eli SPD:t (surge protector device) ovat olennainen osa ukkossuojausta. Niiden sijoittelu tapahtuu aktiivisten johtimien ja maan välille. Aurinkosähköjärjestelmässä asennus tapahtuu invertterin tasasähkötuloon sekä jokaisen paneeliston tasasähkökaapelin päätekohtaan. Esimerkiksi mikroinverttereillä toteutetussa järjestelmässä, jossa suurin osa kaapeleista on vaihtosähköpuolella, ylijännitesuojat asennetaan AC-puolen liitännätarasiaan (kuva 22). [39, s. 364 – 374.]

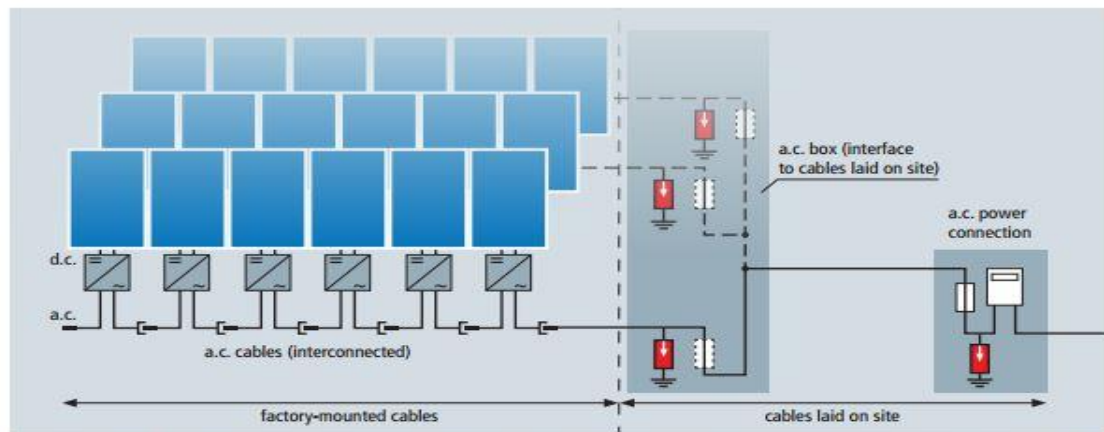


Figure 9.18.18 Example: Building without external lightning protection system; surge protection for a microinverter located in the connection box of the on-site cables

Kuva 22. Mikroinverttereillä toteutetun järjestelmän ylijännitesuojien sijainnit [39].

Standardi IEC 62305 käsittelee ukkossuojausta ja sisältää riskianalyysin, jonka perusteella ukkossuojauksen toteuttamista kannattaa harkita. Ukkossuojaus toteutetaan saman standardin vaatimusten mukaisesti. [39, s. 363.]

8.3 Mekaaninen suojaus

Oravien, lintujen, rottien tai muiden eläinten pääsy paneelien alle olisi hyvä estää esimerkiksi kuvan kaltaisella verkotuksella (kuva 23). Suojaus estäisi myös turhan biologisen massan kerääntymisen paneelien alapuolelle.



Kuva 23. Aurinkopaneelin verkotus [34].

Aurinkopaneelien varkaus on todellinen ongelma ulkomailla. Helposti jälleen myytävät ja ilman valvontaa ympärivuoden olevat paneelit ja muut laitteet ovat houkutteleva kohde varkaille. Laitteiden kiinnitys on usein vain muutaman pultin varassa. Kohteissa, joissa ei ole kameravalvontaa voisi esimerkiksi paneelien kiinnityksessä käyttää normaalikantaisista poikkeavia ruuveja tai muttereita varkauden vaikeuttamiseksi. Myös useiden paneelien yhdistäminen toisiinsa, asennusrakenteiden lisäksi, vaikeuttaisi paneelien viemistä huomattavasti. Varashälytusratkaisuita on olemassa myös aurinkopaneelille. [35.]

Lisäksi palamattoman alustan käyttäminen rakenteiden, ja järjestelmän riskialttiiden osien välillä voisi vähentää palon leviämisen riskiä merkittävästi. [2.]

9 Yhteenveto

Aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamaa paloturvallisuusriskiä pidetään yleisesti pieneenä. Sähköpaloille tyypillisesti tapaturmia kuitenkin on tapahtunut ja niihin on syytä varautua. Rakennukseen integroituna aurinkosähköjärjestelmässä tapahtuva vikatilanne voi johtaa rakennuksen palamiseen ja aiheuttaa riskin pelastushenkilöstölle. Tulipalo rakennukseen vesikattoon integroitavassa järjestelmässä voi potentiaalisesti olla hyvin tuhoisa jatkuvan virransyötön ja katolla olevan lisääntyneen massan takia.

Työssä kerättiin eri lähteitä käyttäen tietoa aurinkosähköjärjestelmien toiminnasta ja niitä koskevista standardeista ja suosituksista. Lisäksi tutkittiin sähköpalojen teoriaa ja käsiteltiin aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien palojen tilastotietoja. Kerätyn tiedon pohjalta eriteltiin yleisimmät syyt aurinkosähköjärjestelmien syttymiseen ja yleisimmät paloja aiheuttaneet komponentit. Lopuksi pohdittiin mahdollisia keinoja paloriskin minimoimiseksi.

Työn tavoite toteutuu ja kerätyn aineiston pohjalta pystytään identifioimaan yleisimpiä syitä aurinkosähköjärjestelmien paloille ja tapoja niiden minimoimiseksi. Tyypillisimmiksi aurinkosähköjärjestelmän palon lähteiksi todettiin vaurioituneet tai vialliset komponentit, tuholaiset, ilkivalta ja ukkonen. Huonon suunnittelun ja/tai asennusvirheiden seurauksena näistä voi seurata oikosulkuja, kipinöintiä tai valokaari. Paloriskin vähentämiseksi pohdittuja tapoja olivat tehostettu järjestelmän valvonta, suojauslaitteet, kuten valokaarivikasuojat, mekaaninen suojaus paneelin ja rakenteiden väliin ulkoisia tekijöitä vastaan. Lisäksi rakennuksen rakenteiden suojaus käyttäen palamatonta materiaalia alustana. Liitteessä 1 on esimerkkisuunnitelma kerrostalon katolla sijaitsevan 20kW aurinkosähköjärjestelmän toteutuksesta, joka on tehty SFS 607 suositusten mukaisesti. Esimerkissä on myös otettu huomioon tässä työssä ilmi tulleet mahdolliset paloturvallisuusriskejä vähentävät keinot.

Tässä työssä käsitellyn tämän hetkisen tiedon pohjalta voidaan todeta paloriskin olevan pieni ja suositusten mukaisesti suunnitellun, asennetun ja ylläpidetyn järjestelmän olevan turvallinen. Kuitenkin aurinkosähköjärjestelmien jatkuva kehittyminen ja lisääntyvä käyttö voivat muuttaa tilannetta tulevaisuudessa.

Lähteet

- 1 Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti kolminkertaistui. Energiavirasto. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaistui-vuodessa>>. Päivitetty 21.6.2017. Luettu 8.9.2017.
- 2 Aurinkopaneeleihin liittyviä huomioita. 2016. Yrityksen sisäinen aineisto. Paloärsät Oy.
- 3 Aurinkopaneeleihin liittyy turvallisuusriskejä. Spek. 2016. Verkkoaineisto. <<http://www.spek.fi/news/Aurinkopaneeleihin-liittyy-turvallisuusriskeja-/kih24s4q/8f3c122c-52c5-4350-8a4e-a51837e3da65>>. Luettu 8.9.2017.
- 4 Aurinkosähkön perusteet. Motiva. 2016. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Luettu 8.9.2017.
- 5 Aurinkosähkön hinnat ja kannattavuus. Finsolar. 2017. Verkkoaineisto. <<http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankintaohjeita/aurinkosahkon-hinnat-ja-kannattavuus/>>. Luettu 8.9.2017.
- 6 Cancelliere Piergiacomo, Mazziotti Lamberto, Paduano Giuseppe. Fire risk related to the use of PV systems in building facades. 2016. Verkkoaineisto. Matec. <https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/09/matecconf_05001.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 7 Autokatos. Naps. 2017. Verkkoaineisto. <http://www.napssystem.com/sites/default/files/2017-05/NAPS%20Autokatos%20A4_web_0.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 8 SFS-käsikirja 607. Aurinkosähköjärjestelmät. 2015. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- 9 Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Motiva. 2017. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma>. Luettu 8.9.2017.
- 10 Aurinkopaneelin toimintaperiaate. Suntekno Oy. 2010. Verkkoaineisto <<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf>>. Luettu 8.9.2017.

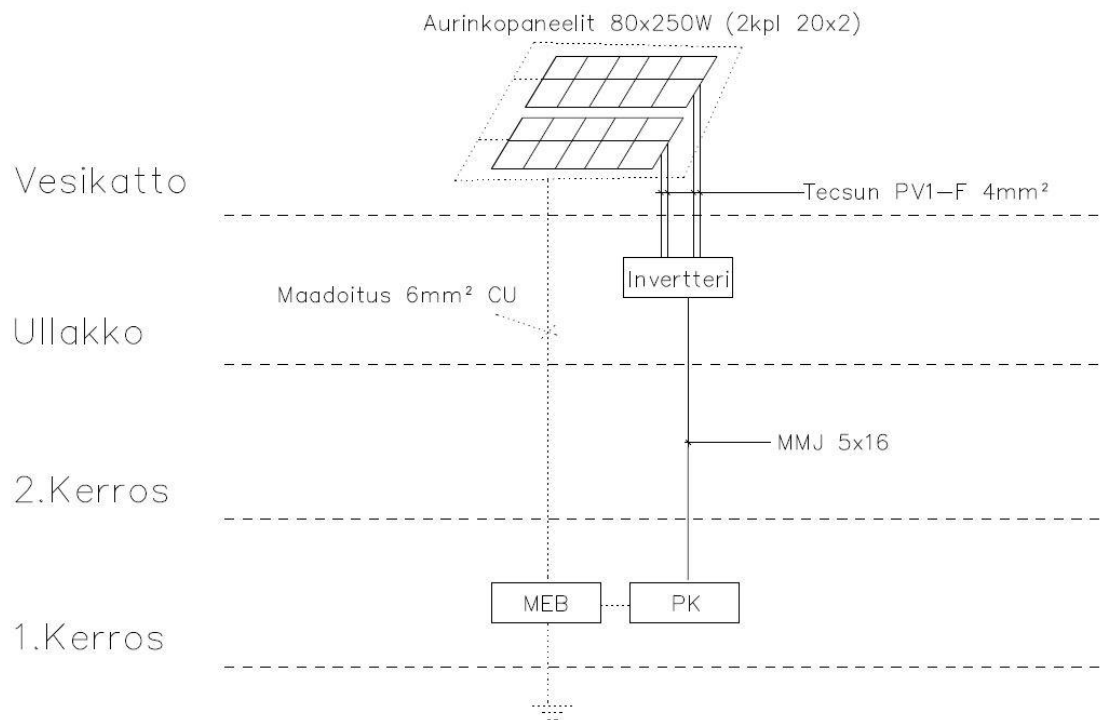
- 11 Solar panel materials, end of life and regulation. NC state. 2016. Verkkomateriaali. <<https://content.ces.ncsu.edu/solar-panel-materials-end-of-life-and-regulation>>. Luettu 8.9.2017.
- 12 Aurinkopaneelit. Aurinkovirta. verkkoaineisto. 2014. <<http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/aurinkopaneelit>>. Luettu 8.9.2017.
- 13 Requirements for photovoltaic modules tested under fire conditions. Tuv rheinland. 2011. Verkkoaineisto. <https://www.tuv.com/media/germany/10_industrialservices/downloads/IEC_61730-2_Firetest_engl_20110209.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 14 Mono vs poly solar panels explained. Energysage. Verkkoaineisto. <<https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>>. Luettu 8.9.2017.
- 15 Solar cells. Solar Facts and Advice. 2013. Verkkoaineisto. <<http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-cells.html>>. Luettu 8.9.2017.
- 16 Transformerless Inverters for Solar PV. Civicsolar. 2011. Verkkoaineisto. <<https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/transformerless-inverters-solar-pv>>. Luettu 8.9.2017.
- 17 What are different types of solar inverters. Solarpowerworld. 2016. Verkkoaineisto. <<https://www.solarpowerworldonline.com/2016/05/different-types-solar-inverters/>>. Luettu 8.9.2017.
- 18 Aurinkopaneelien asennusohje. Finnwind, 2014. Verkkoaineisto. <http://www.finnwind.fi/asennus/Aurinkopaneelien%20asennusohje_FIN.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 19 Advantages and disadvantages of a solar tracker system. Solar Power World. 2016. Verkkoaineisto. <<https://www.solarpowerworldonline.com/2016/05/advantages-disadvantages-solar-tracker-system/>>. Luettu 8.9.2017.
- 20 Perusteet. Aurinkosähkö.fi. 2009. Verkkoaineisto. <<http://www.huoltodata.com/aurinko/perusteet.html>>. Luettu 8.9.2017.
- 21 Raili Alanen, Ismo Heimonen, Seppo Hänninen, Pekka Lahti, Hannu Pihala, Kari Sipilä. 2010. Aurinkosähkön mahdollisuudet Helsingin Östersundomin alueella. VTT. Verkkoaineisto. <http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/yos_2011-12.pdf>. Luettu 8.9.2017
- 22 Arto Sirviö, Aurinkosähkön standardointi. 2016. SESKO. Verkkoaineisto. <http://www.sesko.fi/files/710/Aurinkosahkonstandardointi-Arto_Sirvio.pdf>. Luettu 8.9.2017.

- 23 ST 55.33. Aurinkoenergiaa hyödyntävät laitteet ja niiden liittäminen rakennuksen sähkönjakelujärjestelmään. 2009. Sähkötieto ry.
- 24 Hurley, J Morgan. 2016. SFPE Handbook of fire protection engineering. E-kirja. Springer. Luettu 8.9.2017.
- 25 Lepistö, Jukka; Valkeinen, Hennamari. Sähkö palon syttymissyynä. 2013. Tukes. Verkkoaineisto. <http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/esitteet_ja_oppaat/sahko_palon_syttymissyyna.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 26 Fire and Solar PV systems – Literature Review. BRE National solar centre. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents%20Library/fireproject/P100874-1000-D1-Fire-and-Solar-PV-Systems---Literature-Review-Issue-3.4.pdf>>. Luettu 8.9.2017.
- 27 Rogers, Jon. Solar panel fire fears after panels ignite in new block with thousands possibly at risk. 2016. Express. Verkkoaineisto. <<http://www.express.co.uk/news/uk/826553/Solar-panel-fire-fears-BRE-flats-east-London-Bethnal-Green>>. Luettu 8.9.2017.
- 28 Wirth, Harry. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>>. Luettu 8.9.2017.
- 29 Ketola, Johannes. PRONTO pelastustoimen resurssi- ja onnettomuusjärjestelmä. 2012. Pelastusopisto. Verkkoaineisto. <https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/35548_PRONTO_n_esittely_2012.pdf>. Luettu 8.9.2017.
- 30 Aurinkosähkö tapaturma tilastot PRONTO- järjestelmästä. 2017. Pelastusopisto.
- 31 Renogy MC4 Male/Female solar panel cable connectors. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.renogy.com/renogy-mc4-male-female-solar-panel-cable-connectors/>>. Luettu 8.9.2017.
- 32 Hazards in the installation and maintenance of solar panels. White, James R & Doherty, Mike. 2017. Verkkoaineisto. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7914834/>>. Luettu 8.9.2017.
- 33 What bypass diode. Civic Solar. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.civicsolar.com/support/installer/questions/what-bypass-diode> >. Luettu 8.9.2017.
- 34 How to prevent havoc caused by squirrels in your solar array. Civic Solar. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/how-prevent-havoc-caused-squirrels-your-solar-array>>. Luettu 8.9.2017.

- 35 Fox, Stuart. PV Systems security – Avoiding Theft of Solar Panels or Components. 2011. Civic Solar.
<<https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/pv-system-security-avoiding-theft-solar-panels-or-components>>. Luettu 8.9.2017.
- 36 Bartlett, Joshua. Everything you need to know about solar monitoring. Understandsolar. 2017. verkkoaineisto. <<https://understandsolar.com/solar-monitoring/>>. Luettu 8.9.2017.
- 37 Ylivirtasuojaus. Ensto. 2009. Verkkoaineisto.
<<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594928673/1210594967992.html>>. Luettu 8.9.2017.
- 38 Implementing Arc Detection in Solar Applications: Achieving Compliance with the new UL 1699B Standard. Texas instruments. 2016. Verkkoaineisto.
<<http://www.ti.com/lit/wp/spry209/spry209.pdf>>. Luettu 8.9.2017.
- 39 Lightning protection guide. 2014. DEHN. E-kirja.

20kW aurinkosähköjärjestelmän esimerkkisuunnitelma

Kerrostalon katolle asennettavan 20kW aurinkosähköjärjestelmän johdotusnäköymä. Punaisella merkityissä asioissa on huomioitu paloturvallisuusriskit.



Paneelit	Invertteri	Tasasähkökaapelit
NAPS TP3 MBW 80 x 250 W (paneelistot 20x2) 30.4 V / 608 V 8.23 A / 16.46 A Asennus palamatomalle alustalle	SUNNY TRIPOWER 20000TL 2x MPPT Sisääntulo max 1000V, 33 A Ulostulo 400V, 29 A Sisältää DC-erottimen Tasasähköpuolen ylikuormausuojat Liitännät seurantaan varten SUNCLIX DC-liittimet	Kaapelit mitoitettu 1,25*16.46 A virralle esim. 4x Tecsun PV1-F 4mm ² Asennus kaapelikanavaan (palosuojattu)
Vaihtosähkökaapelit	Maadoitus	Muut
Mitoitettu invertterin ulostulolle esim. MMJ 5x16	Ei salamasuojausta minimi 6mm ² CU	AC ja DC puolen erottimet sisäänkäyntitasolle paloilm. käyttölaitteen tai SPOK läheisyyteen. Valokaarivikasuojat paneelitojen päihin