



SAMI HURSKAINEN

Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuus

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIikka
2021

| | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------|
| Tekijä Hurskainen, Sami | Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK | Päivämäärä 7.3.2021 |
| | Sivumäärä 33 | Julkaisun kieli Suomi |
| Julkaisun nimi Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuus | | |
| Tutkinto-ohjelma SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA | | |
| Tiivistelmä <p>Taustana on tarve selvittää syvemmin jännitteen, virran, säteilyn ja eristysvastuksen käyttäytymistä eri palotilanteissa. Olen auttanut mittauksen tekojärjestelmän suunnittelussa palomekanismien tutkimista varten.</p> <p>Opinnäytetyössä käydään läpi auringon säteilyenergia. Siitä edetään katsomaan tarkemmin eri aurinkopaneelijärjestelmiä.</p> <p>Työssä käydään läpi eri syyt, miksi tulipaloja on syttynyt aurinkopaneelijärjestelmissä. Tulipalon syttymiseen ja tulipalon käyttäytymiseen on mietitty eri tutkimustapoja.</p> <p>Pohdintana on myös mitä pelastushenkilökunnan tulee varoa tullessaan tulipalopaikalle sähköön näkökulmasta.</p> <p>Työssä on ohjeistusta mitä tulee huomioida aurinkosähköjärjestelmien asennusta tehdessä tulipaloja ehkäisevästä näkökulmasta.</p> | | |
| <u>Asiasanat</u> Aurinkoenergia, Aurinkopaneeli, Aurinkosähköjärjestelmien palosyitä. | | |

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Author Hurskainen, Sami | Type of Publication Bachelor's thesis | Date 7.3.2021 |
| | Number of pages 33 | Language of publication: finnish |
| Title of publication Solar electrical system fire safety | | |
| Degree program Electrical and Automation Engineering | | |
| Abstract <p>The background is the need to study in more depth the behavior of voltage, current, radiation and insulation resistance in different fire situations. I have assisted planning measuring system for the study of the design of the flammable mechanisms.</p> <p>The radiation energy of the sun is reviewed in the thesis. After that I take a look at the various solar panel systems.</p> <p>The work examines the various reasons why fires have ignited in solar panel systems. Different research methods have been considered for fire ignition and fire behavior.</p> <p>There is also a consideration of what rescue personnel should be careful about when entering a fire scene from electrical perspective.</p> <p>The work contains guidelines that must be considered when installing photovoltaic systems from a fire prevention perspective.</p> | | |
| <u>Key words</u> Solar energy, Solar Panel, Solar energy systems fire hazards and reasons for them. | | |

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 2 AURINGON SÄTEILYENERGIA | 8 |
| 3 AURINKOPANEELI YLEISESTI..... | 12 |
| 3.1 Off-Grid järjestelmä (Verkosta irti oleva järjestelmä)..... | 14 |
| 3.2 On-Grid järjestelmä (Verkkoon kytkettävä järjestelmä)..... | 15 |
| 4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN PALOSYITÄ | 19 |
| 5 SÄHKÖ VAARATEKIJÄNÄ | 20 |
| 5.1 Sähköiskun vaara palotilanteessa ja työturvallisuus | 22 |
| 5.2 Riskien arviointi | 24 |
| 5.3 Syttymisturvallisuus..... | 26 |
| 6 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN POLTTAMINEN JA SIIHEN LIITTYVÄ TUTKIMISLAITTEISTO | 28 |
| 7 JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 31 |
| LÄHTEET | |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Avoimen piirin jännite U_{oc}

Open circuit voltage, tyhjäkäyntijännite.

Koko paneeliketjun kokonaisjännite, kun aurinkopaneelin tuotto on suurimmillaan (Lehto ym. 2017, 25).

Invertteri

Invertteri on laite, jossa tapahtuu tasavirrasta muutos vaihtovirraksi, mutta termiä nykyisin käytetään muille säätimille, ohjaaville laitteille ja samanlaisille laitteille (Lehto ym. 2017, 25).

Akku

Akku on sähköenergiaa varastoiva laite (Ahoranta 2017, 24).

Aggregaatti

Aggregaatti on sähköä tuottava sähkövoimakone, jota voidaan käyttää akuston lataamiseen aurinkosähköjärjestelmässä (Salo 2014).

Lataussäädin

On säädin, joka säätää jännitteen korkeutta ja alarajaa, ettei akkua tule ladattua liian paljon tai liian paljon, joka voisi vaurioittaa akkua (Aurinkosähkö 2021).

Turvakytkin

Turvakytkin on kytkin, joka katkaisee virran kulun suunnasta A suuntaan B. Aurinkopaneelijärjestelmissä yleensä on turvakytkintä käytetty sähkön katkaisua varten aurinkopaneeleilta invertterille DC tai invertteriltä eteenpäin AC (Lehto ym. 2017).

MPPT-säätö

MPPT on (Maximum Power Point Tracking)

Säätötekniikkaa käyttävä laite, joka koko ajan mittaa aurinkopaneelien toiminnallista jännitettä. Tällä saavutetaan paras mahdollinen hyötysuhde (Lehto ym. 2017, 26).

PWM-säätö

PWM (Pulse Width Modulation) control, pulssinleveysmodulaatio, pulssisäätö. Vaihtosuuntaajissa ja muissa säätimissä käytettävä menetelmä, jolla katkotaan jännitteen ja virran voimakkuutta päälle ja pois päältä nopeasti (Lehto ym. 2017, 26).

kW/m²

kW/m² (Kilowatti per neliömetri) (Säteilynvoimakkuus)

Eli kuinka monta wattia auringosta kohdistuu paneelin pinnalle neliometriä kohden. Tämän säteilyn voimakkuuden merkintä on tuntia kohden, vaikka ei näy merkinnässä. 1W on 0,001 kilowattia (Ala-Myllymäki 2016).

AVD-sammute

AVD palosammute on suunniteltu sammuttamaan paloja litiumakuissa sekä kiinteissä metalleissa. Soveltuu erittäin hyvin aurinkojärjestelmien akustojen sammutukseen (Sammutinpalvelu 2021).

1 JOHDANTO

Työn tavoitteena on tutkia paloturvallisuutta aurinkosähköjärjestelmissä. Aluksi kerron auringon säteilyenergiasta eri puolella Suomea. Seuraavaksi kerron erilaisista aurinkopaneelijärjestelmistä. Tämä auttaa lukijaa ymmärtämään paremmin eri tavalla asennettuja järjestelmiä myös paloturvallisuuden kannalta.

Opinnäytteeseen on lisätty kuvia eri paikkoihin asennetusta aurinkopaneelijärjestelmistä. Tämä auttaa tunnistamaan eri asennuksia ja kokonaiskuvaa aurinkopaneelien erilaisista asennuksista. Esimerkiksi jos verrataan aurinkopaneeli seinää tai katolle asennettuja aurinkopaneeleita. Asennustapa on erilainen, invertterin sijainti on eri paikassa, kaapeleiden reitti on eri.

Lisääntyvät aurinkopaneelijärjestelmät tuottavat jonkin verran työturvallisuus riskejä pelastushenkilökunnalle, suurimmat syyt ovat olleet väärin asennetut tai vialliset osat järjestelmissä. Opinnäytetyössä mietitään mahdollisia aurinkosähköjärjestelmien syytymissyitä sekä kerrotaan sähkönvaaratekijöistä palotilanteissa.

Opinnäytteessä suunnitellaan aurinkosähköjärjestelmän polttamiseen käytettävä mittausjärjestelmä. Mittausjärjestelmä on suunniteltu aurinkosähköjärjestelmään, se poltetaan sekä polttoharjoitus videoidaan. Videointi ja itse polttaminen ei kuulu opinnäytteen laajuuteen. Opinnäytetyö on osa suurempaa hanketta missä etsitään keinoja tutkia eri palomekanismeja Satakunnan ammattikorkeakoulun avulla.

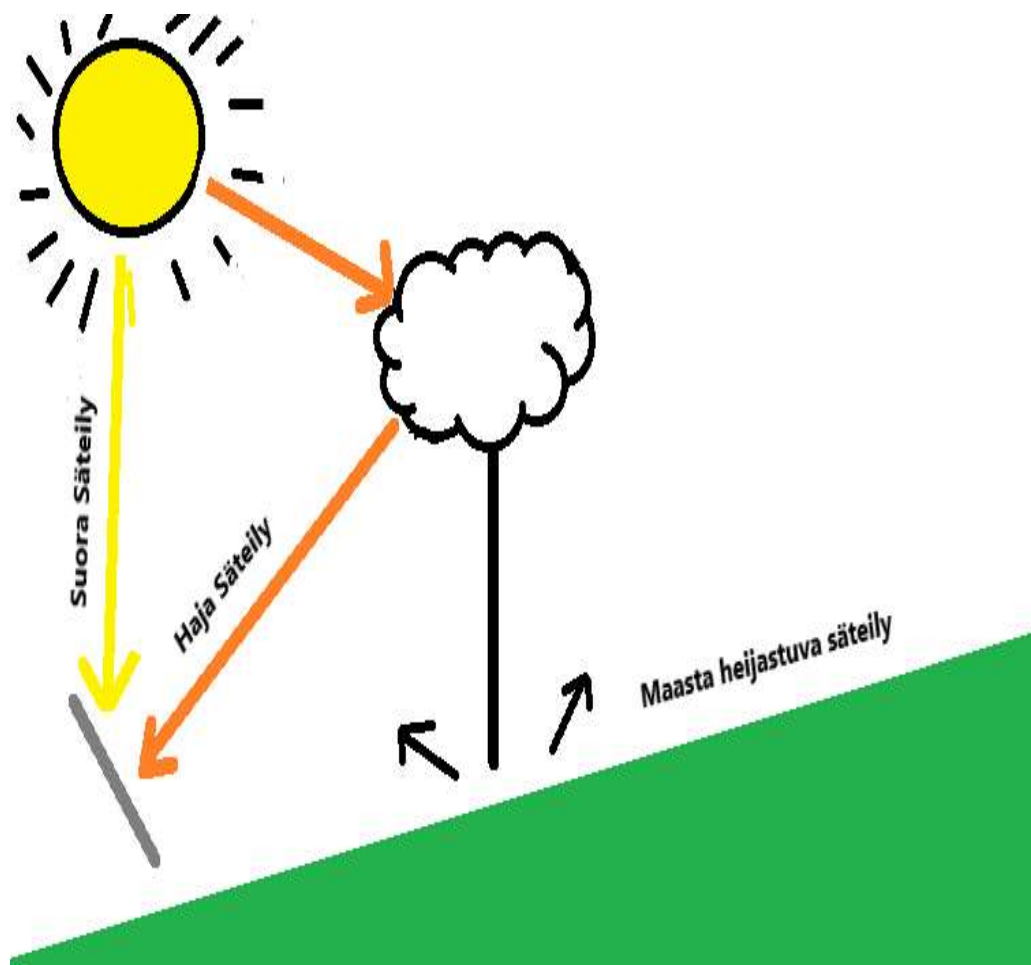
2 AURINGON SÄTEILYENERGIA

Seuraavaksi asioita, jotka lisäävät aurinkopaneelien asennusten kasvamista. Aurinkosähkötekniikan kysyntä on kasvanut tasaisesti vuosi vuodelta suuremmaksi, kun vihreimpien teknologioiden kysyntä on kasvanut. Kasvihuonepäästöjen vähentäminen poliittisen paineen alla nopeuttaa alan kasvua. Aurinkopaneelin hinta on huomattavasti laskenut 10 vuoden sisällä (Euroopan komissio 2020).

Aurinkovoimalaitosten määrä myös näyttää kasvujohteiselta. Aurinkovoimalat ovat myös suurempia, kun aikaisemmin. Megawatti peak teho on korkeampi (wikipedia 2021).

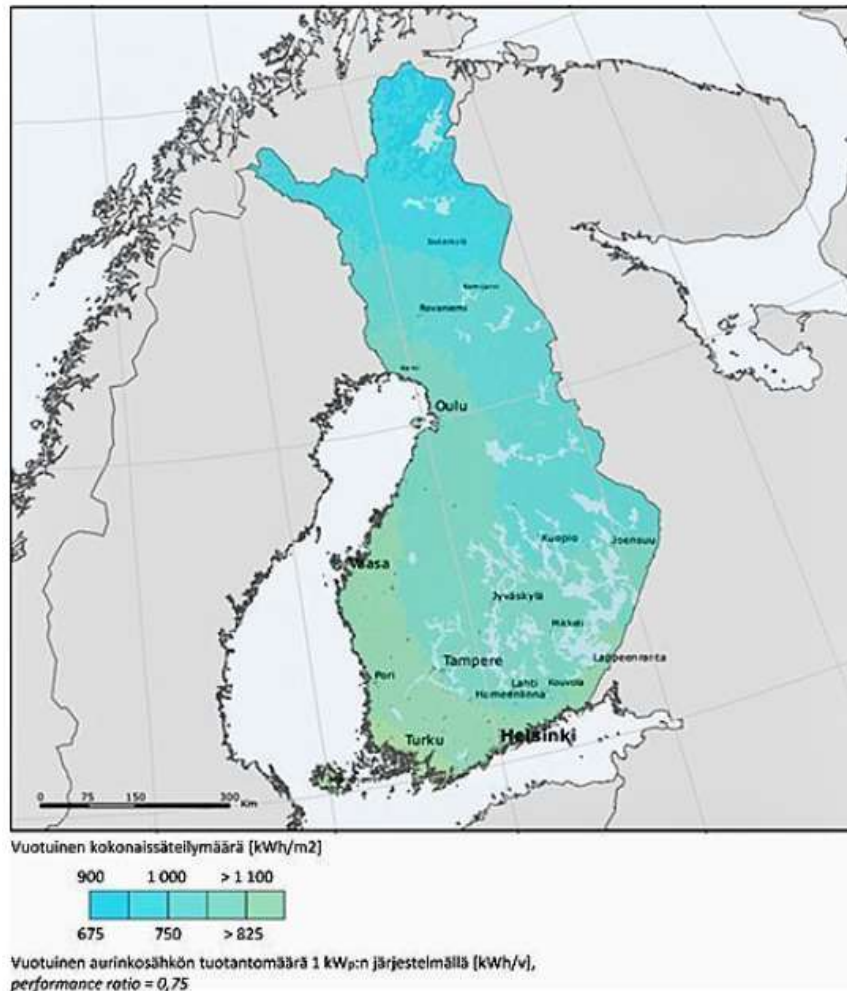
Pieni selostus siitä mitkä asiat vähentävät auringonsäteilyn tehoa matkalla aurinkopaneelille asti. Auringosta tulevaa säteilyä saapuu neliömetrin kokoiselle pinnalle tehoa 1,35–1,39 kW. Maapallo kiertää aurinkoa ja tässä muodostuu etäisyyden vaihtelua \pm 3,5 prosenttia. Kun säteily kulkee ilmakehän läpi, siitä häviää suurimmillaan 40 %. Kun aurinkovakio saavuttaa 1,368 kW/m² tehon on parhaimmillaan mitattu 1kW/m² säteilyteho (Tahkokorpi 2016, 12).

Kuvassa 1 voi nähdä auringonsäteilyn heijastuksen. Aurinkopaneelit saavat säteilyn suoraan auringosta, jota sanotaan suoraksi säteilyksi ja hajasäteily on esimerkiksi pilvien läpituleva säteily. Maasta heijastuu osa säteilystä takaisin ympäristöön ja pieni osa jopa aurinkopaneeliin (Erat ym. 2018, 12).



Kuva 1. Auringon säteilyn heijastus (Erat, 2018, 12).

Auringonsäteilyn voimakkuus vuositasolla Suomessa on esitetty (kuva 2). Tästä näemme 1kWp järjestelmälle lasketun tuoton 25 % häviöillä laskettuna. Vuosittainen kokonaissäteily määrä on myös (kuva 2:ssa). Etelässä on huomattavasti enemmän säteilyä ($< 1100 \text{ kWh/m}^2$) kuin pohjoisessa ($< 900 \text{ kWh/m}^2$) (Motiva, 2020).



Kuva 2. Säteilyn kokonaismäärä vuositasolla kWh/m² ja aurinkosähkön tuotanto 1kwp kWh/v (Motiva, 2020).

Sääasema Joutsassa (Keski-Suomessa) mitatun säteilyenergiasta tehdyssä taulukossa 1 esitetään eri kuukausien suurimmat arvot wattituntia neliometriä kohden. Tällä tiedolla näemme mikä on korkein säteily arvo kuukauden aikana. Esimerkiksi tammikuussa on 85W mitattu korkeimmaksi arvoksi. Myös jos haluamme vertailla tammikuuta kesäkuuhun seuraavaksi teemme jakolaskun asiasta.

Tammikuu/Kesäkuulla $85/1108 = 0.076$. Tämän kertomalla 100 saamme tulokseksi 7.6%, joka on suuntaa-antava tulos säteilyenergiasta. Tätä tulosta jo itsessään voi käyttää arviointiin millainen ero syntyy tammikuun ja kesäkuun energian tuotantoon verrattuna. Tähän vielä mainittaneen aurinkopaneelit testataan laboratoriossa $1000\text{W}/\text{m}^2$ tätä arvoa kutsutaan Wp arvoksi (Ruunula www-sivut 2019).

Taulukko 1. Säteilysenergian maximi-arvo esitetty kuukausitasolla W/m^2 (Joutsa) (Ruunula www-sivut 2019).

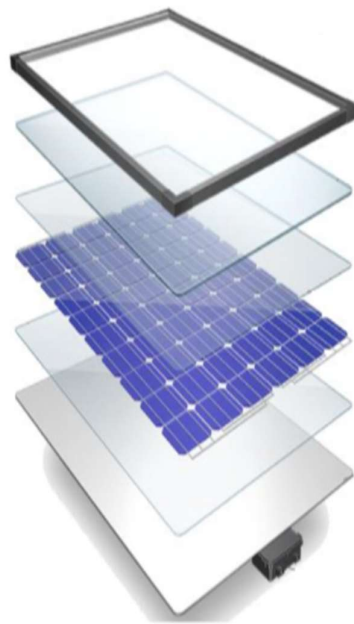
| Kuukausi | Maximi-arvo (W/m^2) |
|-----------|-------------------------|
| Tammikuu | 85 |
| Helmikuu | 421 |
| Maaliskuu | 856 |
| Huhtikuu | 865 |
| Toukokuu | 970 |
| Kesäkuu | 1108 |
| Heinäkuu | 998 |
| Elokuu | 924 |
| Syyskuu | 689 |
| Lokakuu | 544 |
| Marraskuu | 241 |
| Joulukuu | 73 |

3 AURINKOPANEELI YLEISESTI

Aurinkopaneeli on laite, jolla muutetaan auringon säteilyenergia sähköksi. Mainitaan myös, että korkeatehoinen valo nostaa myös aurinkopaneelien jännitettä (ei led valolla suurta vaikutusta). Aurinkopaneeleita kytketään, joko sarjaan tai rinnan riippuen halutusta lopputuloksesta. Mitä enemmän paneeleita on sarjassa, sitä suuremmaksi sähköiskun vaarallisuus kasvaa samalla. Jännite kasvaa jokaisen paneelin kohdalla suuremmaksi. Esimerkiksi kolme paneelia sarjan olisi $U=3 * U$ kenno. Rinnankytkentäisessä paneeleita jännite pysyy samansuuruisena, mutta antovirta kasvaa samassa suhteessa. Esimerkkinä kolme paneelia $I=3 * I$ kenno. Aurinkopaneeleissa syntyvä sähköenergia on tasavirtaa DC. Kuvassa 3 näkyy aurinkopaneelin rakenne (Ahoranta 2017, 298).

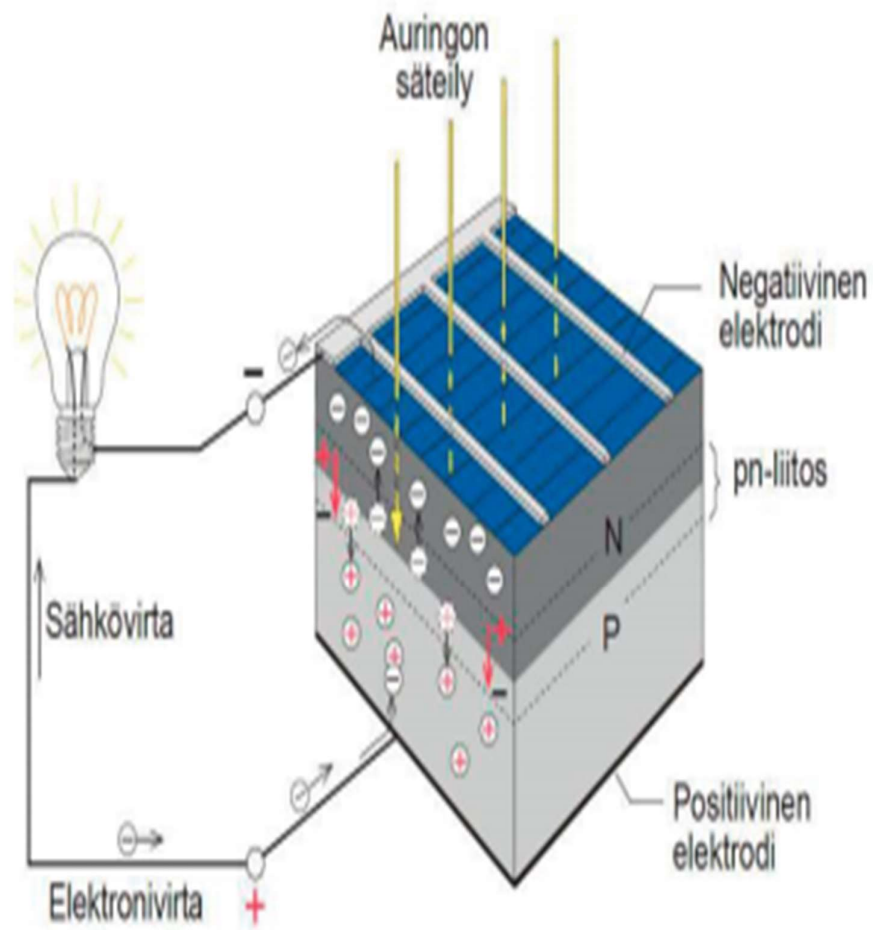
Solar Panel Construction

March 20, 2020 · Jason Svarc



Kuva 3. Aurinkopaneelin rakenne (Svarc 2020).

Auringosta tuleva säteilyenergia osuessaan aurinkopaneelin pintaan synnyttää PN rajapinnassa aukkopareja nämä aukkoparit mahdollistavat elektronien kulkemisen N puolijohteesta P puolijohteeseen. Mitä suurempi auringonsäteily energia on osuessaan aurinkopaneeliin niin sitä enemmän syntyy varauksen kuljettajia. Tämä johtaa siihen, että tyhjäkäyntijännite U_{oc} kasvaa samalla. Kuvassa 4 näkyy tarkemmin kenno rakenne (Ahoranta 2017, 295).

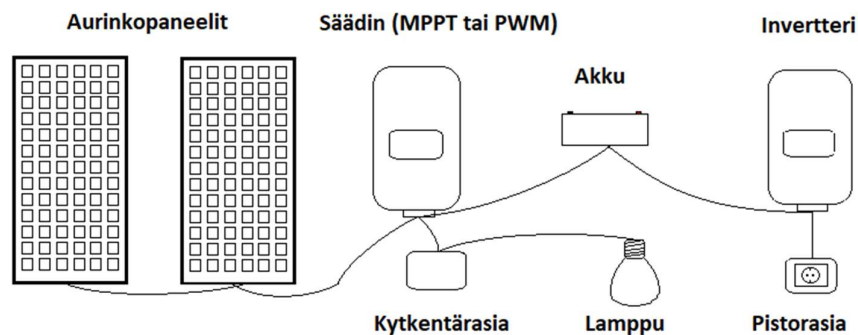


Kuva 4. Aurinkokennon toimintaperiaate (Ahoranta 2017).

3.1 Off-Grid järjestelmä (Verkosta irti oleva järjestelmä)

Off-grid järjestelmän tarkoituksena on käyttää ainoastaan auringon antamaa säteilyenergiaa, jonka takia ei tarvitse lainkaan sähköverkkoon liittymistä. Järjestelmät ovat yleensä asennettuina kesämökkeihin. Näissä järjestelmissä on akusto. Jännitteenä yksi seuraavista jännitetasoista 12VDC, 24VDC tai 48 VDC. Tämä jännite muutetaan invertterillä tutuksi 230VAC normaaliksi verkkojännitteeksi. Tämä on yleisin tapa tehdä järjestelmä. Järjestelmä voi olla myös kokonaan tehtynä pienjännitteellä 12VDC.

Tyypillisesti off-grid järjestelmään kuuluu lataussäädin, akkuja, invertteri ja telineet. Aggregaattia käytetään myös mutta se ei ole niin yleistä. Kuvassa 5 on yksinkertaistettuna Off-Grid järjestelmä (Perälä 2017, 62).

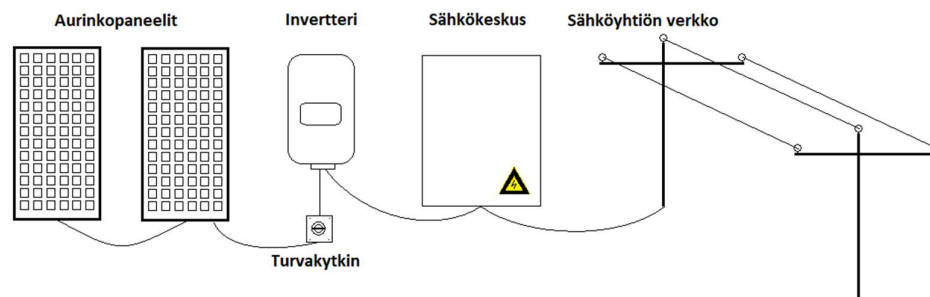


Kuva 5. Off-Grid järjestelmä (Lehto ym. 2017, 45).

3.2 On-Grid järjestelmä (Verkkoon kytkettävä järjestelmä)

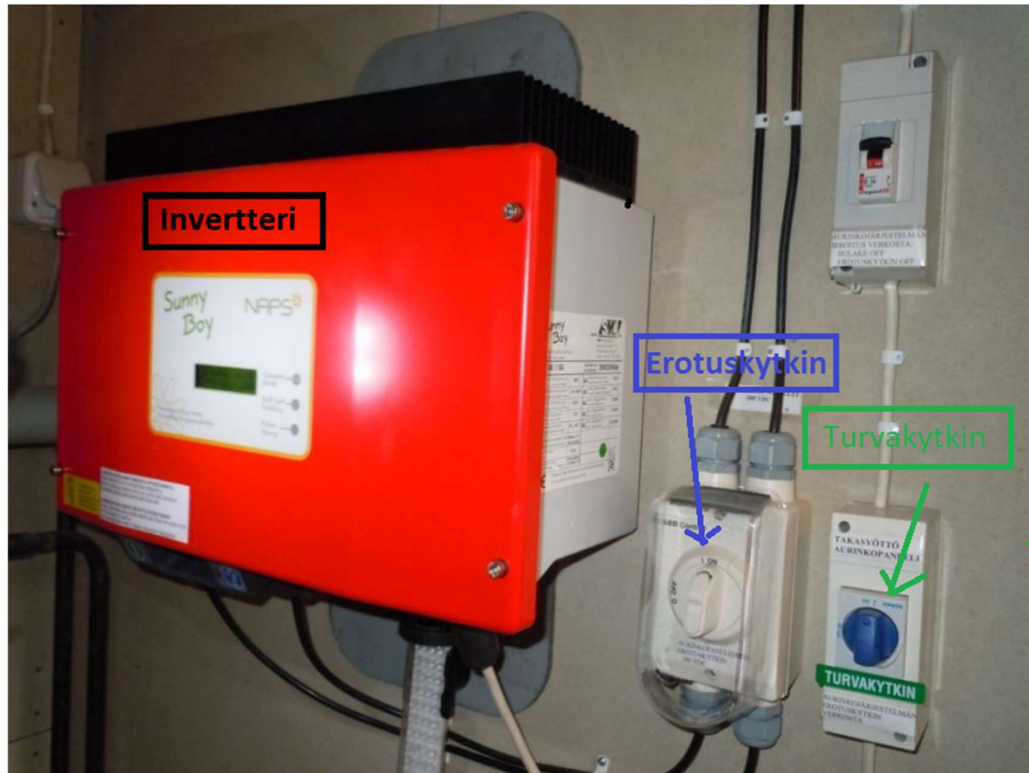
On-Grid järjestelmiä on 1 vaiheisia tai 3 vaiheisia. Järjestelmät on kytketty niin, että aurinkopaneelit syöttävät auringosta saapuvaa energiaa talon hyötykäyttöön (Valot, kodinkoneet, pistorasiat ja kaikille yleisille sähköä tarvitseville laitteille). Tämän jälkeen kaikki ylimääräinen sähkö ohjataan sähkölaitoksen asentaman sähkömittarin kautta takaisin sähköverkkoon. Tällaisissa järjestelmissä pystytään hyödyntämään sähköverkosta saatavaa energiaa, kun paneelit eivät tuota sähköä. Esimerkiksi öisin aurinkopaneelisto ei tuota sähköä. Yleisesti käytettyjä komponentteja ovat aurinkopaneelit, invertteri, turvakytin, telineet ja muut pienkomponentit (Lehto ym. 2017.)

Mitä pitemmälle mennään talvea kohti aurinkoenergian tuotanto, vähenee aurinkopaneeleissa. Se on selvä merkki sille, että sähkön tarve kasvaa, joten on erittäin hyvä olla On-Grid järjestelmä Suomessa- Kuva 6 yksinkertaistettu On-Grid järjestelmä.



Kuva 6. On-Grid järjestelmä (Lehto ym. 2017, 44).

Kuvassa 7 voimme nähdä aurinkosähköjärjestelmän kytkennän invertterille. Aurinkopaneeleita tuleva erotuskytkin katkaisee DC puolen virran. Aurinkosähköjärjestelmän erotuskytkin (Turvakytkin) erottaa AC puolen virran.



Kuva 7. Aurinkosähköjärjestelmän kytkentä Sunny Boy 1100 (Paavola 2013, 24).

Porin uimahallin katolle asennettu aurinkosähköjärjestelmä (kuva 8) tuottaa 45000kWh vuodessa. Sen jälkeen paneelit syöttävät sähkön inverttereille (kuva 9). Kuvassa myös näkyy taustalla tasokeräimiä, jotka suuren määrän lämpöenergiaa, jota käytetään altaiden lämmitykseen. Tämän tapaiset ratkaisut tulevat yleistymään (Solarforum 2011).



Kuva 8. Porin uimahallin aurinkopaneelit ja aurinkokeräimet taustalla (Solarforum 2011).



Kuva 9. Porin uimahallin invertterit (Solarforum 2011).



Kuva 10 Avitorin asentama vaaka asennus (Avitor 2021).

Kuvassa 10 vaaka asennus rakennuksen katolle ja huomattava määrä aurinkopaneelleita. Kuvassa 11 on näyttävästi asennettu aurinkopaneeliseinä julkisivuun kiinni. Huomattava määrä paneelleita. Paloturvallisuuden kannalta asennukset tulee tehdä huolella ja turvallisuusmääräyksiä noudattaen.



Kuva 11. Aurinkopaneeliseinä julkisivussa (Ala-Prinkkilä 2016).

4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN PALOSYITÄ

Rasinkosken selvityksen perusteella Englannissa ja Saksassa yleisimmät syttymissyöt ovat olleet huonot liitokset sekä väärin mitoitetut kytkimet. Englannissa suunnittelu- virheen tai asennus virheen osuus on ollut 77 %. Saksassa ollut suuria paneelivikoja ja ainoastaan asennus virheiden osuus arvioitu olevan 55 %. Alankomaissa liitin vikoja enimmäkseen, jos niitä pidetään asennus vikoina niin osuus asennusvivoista ollut 80 % (Rasinkoski 2020).

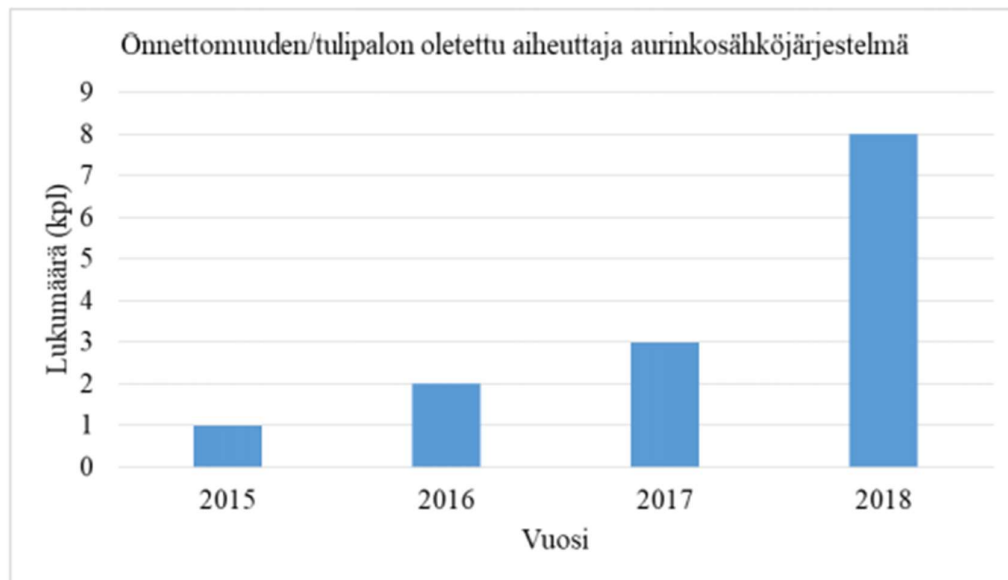
Taulukko 2. Saksa ja UK viat jaoteltuina (Rasinkoski 2020, 2-7).

| | DC-liittimet | DC-kytkimet | AC-asennukset | Paneelivika | Inverteri | Muut |
|-------|--------------|-------------|---------------|-------------|-----------|------|
| Saksa | 10 % | 7 % | 16 % | 24 % | 17 % | 25 % |
| UK | 22 % | 39 % | 0 % | 7 % | 15 % | 17 % |

Dc-valokaari on suurin palonsyyn aiheuttaja. Syitä miksi valokaari syntyy, on selvitetty tutkimuksessa ja ne ovat olleet huono liitos dc kytkimessä, huono liitos kytkentärasiasissa ja eristevika (Rasinkoski 2020, 2–8).

Yhdysvalloissa on käytetty toiminallisesti maadoitettuja aurinkopaneeleita, näissä on huonona puolena se, että yksittäinen eristevika mahdollistaa valokaaren syntymisen ja maasulun. Suomessa käytetään kelluvia järjestelmiä, joissa ei ole samaa ongelmaa. Yhdysvalloissa on toiminnallisesti maadoitettujen järjestelmien takia inverttereihin laitettu AFCI piiri (Arc Fault Circuit Interruption) Tämä piiri havaitsee valokaaren ja katkaisee virtapiirin (Rasinkoski 2020, 2–8).

Kuva 12 on Kuismanen tutkimuksesta tulipaloista, jotka ovat aiheutuneet Suomessa hän on katsonut PRONTO järjestelmästä. Tämä on suuntaa antava kuva Suomessa aiheutuneista tulipaloista, jotka on aurinkosähköjärjestelmä aiheuttanut. Itse en lähde arvioimaan syytymissyytä sen tarkemmin.



Kuva 12 Onnettomuuden/tulipalon oletettu aiheuttaja (Kuismanen, 2019, 20).

5 SÄHKÖ VAARATEKIJÄNÄ

Sähköiskussa sähkö kulkee ihmiskehonläpi. Sähköiskussa vakavuus määräytyy virransuuruuden ja sähköiskun keston mukaan. Erityisen vaarallisia ovat tilanteet, joissa sähkö kulkee sydämen kautta. Sähkövirta kulkee vasta kuin kahden eri jännitetason välille löytyy sähköä johtava reitti (Huttu ym. 2016).

Sähkö johtaa, korkeamman ja matalamman jännitteen välille muodostuu yhteys. Sähkövirta on sitä suurempi mitä paremmin syntynyt reitti johtaa sähköä. Kulkiessaan kehon läpi sähkövirta aiheuttaa palovammoja ja vaurioittaa elimistöä (Saarelma 2021).

Vakavia sähköiskun seurauksia ovat muun muassa keskushermoston vaurioituminen hengityksen salpaantuminen ja sydämen rytmin sekoittuminen. Jo lyhyt sähköisku pistorasiasta voi aiheuttaa sydämen vajaatoimintaa tai pahimmassa tapauksessa kammiövärinää (Huttu ym. 2016).

Lähellä syttynyt valokaari voi aiheuttaa palovammoja, sokaistumista tai työvaatteiden tai lähellä olevan rakenteiden syttymisen. Kun on tarpeeksi suuri jännite sähköiskun voi saada koskematta suoraan jännitteelliseen osaan. Mitä suurempi jännite sitä pidemmältä voi saada sähköiskun. Esimerkiksi ilman kosteus tai savun muodostus mahdollistavat tilanteen, jolloin sähköiskun voi saada koskematta jännitteellistä osaa (Huttu ym. 2016).

Askeljännite syntyy katkenneesta tai maahan pudonneesta johtimesta. Jännite ei aina katkea automaattisesti, vaikka sähköjärjestelmät pyritään rakentamaan kestävämmän viikatilanteet. Koska maa johtaa sähköä syntyy maahan jännite. Jännite pienenee etäisyyden kasvaessa. Kun ihminen ottaa askeleen on toisen jalan alla suurempi jännite kuin toisen jalan alla. Siksi ihmisen jalkojen välille syntyy jännite ero. Jännite erosta syntyvä ero on hengenvaarallinen. Maahan pudonneeseen johtoon on aina suhtauduttava kuin siinä olisi jännite (Huttu ym. 2016).

Taulukko 4 kuvaa AC virran vaikutusta ihmiskehossa. Tästä taulukosta näemme suoraan AC virran vaikutuksia ja siten auttaa pitämään mielessä sähkön vaarallisuuden.

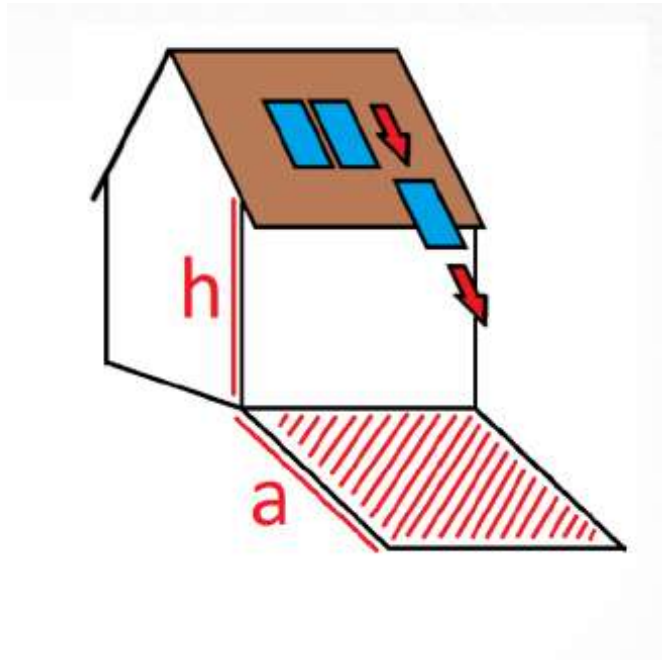
Taulukko 4. Sähkön aiheuttamat vammat (Saarelma 2021).

| Virran voimakkuus(mA=milliampeeri) | Vaikutus |
|------------------------------------|--|
| 1 mA | Ei juuri tunnettavissa mahdollisesti pistelevä tunne |
| 3-5mA | Lapsi pysyy itse irrottautumaan sähkövirrasta |
| 6-9mA | Aikuinen pystyy itse irrottautumaan sähkövirrasta |
| 16-20mA | Lihasten kouristelu |
| 20-50mA | Hengityslihasten lamaantuminen (hengenspysähdys) |
| 50-100mA | Sydämen kammiovärinä |
| Yli 2A | Sydämen sähköinen toiminta pysähtyy |
| 10-20A | Yleinen taloussähkön sulakkeiden kestävyys |

5.1 Sähköiskun vaara palotilanteessa ja työturvallisuus

Aurinkopaneelien putoamisvaara-alue on hyvä tiedostaa, koska tulipalon edetessä aurinkopaneelien kiinnikkeet voivat irrota ja paneelit lähteä liukumaan alaspäin ja lopulta putoamaan. Aurinkopaneelien putoamisalue (kuva 13) (Läderberg 2020b).

SAMK poltto testissä todettiin aurinkopaneelien alumiinikehysten sulavan. Aurinkopaneeleista palaessa siitä muodostui pisarointia. Kun poltto edistyi pitemmälle materiaalia, tippui paloina maahan. Aurinkopaneelin karkaistu lasi pysyi melko ehjänä polton loppuun saakka, mutta pirstaloitui sammutuksessa, kun sai vettä kuumaan pintaan (Ylinen 2021).



Kuva 13. Aurinkopaneelien putoamisalue (Läderberg 2020a).

Rasinkosken tekemässä selvityksessä tehtiin koe, jossa selvitettiin suojavaatteiden vaikutusta vuotovirtoihin ja sähköiskun riskiin. Testissä ei kerrota jännitteen korkeudesta tai virran korkeudesta, mutta voimme käyttää suuntaa antavina seuraavia johtopäätöksiä mitkä tulivat testin tuloksista. Kuiva sammutusasu estää sähköiskun riskin. Kastuneet suojavaarusteet eivät suojaa sähköiskulta, kun virran kulkureitti on kädestä käteen. Virran kulkureitti kädestä jalkaan estyy suojsaappaiden korkea sähkövastuksen takia (Rasinkoski 2020).

Työskennellessä tulvivissa huonetiloissa on erittäin suuri sähköiskun riski viallisista/jännitteellisistä kaapeleista. Kaapelihyllyjä ja kaapeleita on suositeltavaa välttää koskemasta koska päältäpäin ei voi todeta ovatko ne jännitteellisiä vai eivät (Rasinkoski 2020).

Tulipalossa aurinkopaneelisiin pitää suhtautua jännitteellisenä. Tämä johtuu siitä, että auringon säteilyenergia sähköistää aurinkopaneelit aina kuin ne saavat valoa taivaalta (Tahkokorpi 2016).

Erittäin tärkeänä asiana painottaisin invertterin ja turvakytkimien sijainnin löytymistä ja niistä asianmukainen virrankatkaisu. Invertteri voi sijaita sisällä tai ulkona. DC

puolen virrankatkaisu on aurinkopaneeleille menevän sähkön virrankatkaisu. AC puolen virrankatkaisu on invertteriltä eteenpäin virran katkaisua. Katso kuva 7 siinä on molemmat kytkimet merkittynä. Riippuen täysin asennuksesta ovatko molemmat kytkimet asennettuna yleisesti AC puolen kytkin pitäisi löytyä (Paavola 2013).

5.2 Riskien arviointi

Riskien arvioinnilla saadaan todennäköinen näkökulma riskistä ja auttaa analysoimaan riskin suuruutta ja todennäköisyyttä. Taulukossa 5 on esitetty tapahtuman todennäköisyys (epätodennäköinen, mahdollinen ja todennäköinen). Taulukossa on esitetty tapahtuman seuraukset (1 merkityksetön riski, 2 vähäinen riski, 3 kohtalainen riski, 4 merkittävä riski ja 5 sietämätön riski). Tapahtuman seuraukset kohdassa arvioidaan pienimmästä seurauksesta suurimpaan seuraukseen asti, esimerkiksi 5 sietämätön riski on henkilön kuolema. Lievässä tapauksessa olisi ruhje ja tämän seuraus olisi 1 merkityksetön riski.

Taulukko 5. Riskien suuruuden arviointi osa 1 (VTT 2009).

| Tapahtuman todennäköisyys | Tapahtuman seuraukset | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Epätodennäköinen | 1.Merkityksetön-riski | 2.Vähäinen riski | 3.Kohtalainen riski |
| Mahdollinen | 2.Vähäinen riski | 3.Kohtalainen riski | 4.Merkittävä riski |
| Todennäköinen | 3.Kohtalainen riski | 4.Merkittävä riski | 5.Sietämätön riski |

Taulukon käyttämiseen ohje. Mietitään tapahtuman todennäköisyys, että millä todennäköisyydellä onnettomuus tapahtuu. Valitaan todennäköisyys vasemmalta. Nyt voimme käyttää suoraan riviä mikä muodostuu vasemmalta oikealle esimerkiksi (mahdollinen todennäköisyys) valittuna. Sen jälkeen mietitään tapahtuman seuraukset. Vaihtoehtoina meillä on jäljellä (2 Vähäinen riski, 3 kohtalainen riski ja 4 merkittävä riski). Riippuen oletetusta tapahtuman vakavuudesta valitaan joku seuraavista.

Esimerkiksi valittuna 3 kohtalainen riski. Nyt on riskin suuruus arvioitu ja tätä voimme käyttää jatkossa. Taulukossa 5 on esitetty nämä asiat.

Riskin arvioinnin jälkeen olen kirjannut tulokset taulukkoon 6. Taulukossa on ensimmäisessä sarakkeessa riski tai ongelma. Toisessa sarakkeessa toteutumisen todennäköisyys. Kolmannessa sarakkeessa pahimmat seuraukset ja riskin suuruus. Neljännessä sarakkeessa toimenpiteet.

Taulukko 6. Riskien suuruuden arviointi osa 2.

| Riski tai ongelma | Toteutumisen todennäköisyys | Pahimmat seuraukset ja Riskin suuruus | Toimenpiteet |
|---|-----------------------------|--|---|
| 1.Ei saada sähköjä pois aurinkopaneeleista ja tulee sähköisku vioittuneesta aurinkosähköjärjestelmästä. | Todennäköinen | Sähköiskun saaminen, putoaminen katolta sähköiskun saannin seurauksena, vakava loukaantuminen, kuolema Riskin suuruus 5 | Vältetään koskemista aurinkopaneeleihin, Pidetään kuivat hanskan käsittelyssä aurinkopaneelijärjestelmää tai kaapeleita |
| 2.Vaihejohto sulaa kaapelikourussa ja sähköistää kaapelikourun. | Epätodennäköinen | Sähköiskun saaminen, kuolema Riskin suuruus 3 | Vältetään koskemista johtokouruihin, Pidetään kuivat hanskat pienentämään riskiä. Pääkytkimen avaus ja Aurinkojärjestelmän pääkytkimen avaus. |
| 3.Tulipalon sattuessa aurinkopaneelin kaapelit sulavat ja sähköistävät peltikaton | Mahdollinen | Sähköiskun saaminen, kuolema Riskin suuruus 4 | Ei mennä katolle, jos näkyy selvästi, että kaapelit ovat vaurioituneet. |

| | | | |
|--|---------------|--|---|
| 4. Akkupalo | Todennäköinen | Palokaasujen leviäminen ja siten hengittäminen Riskin suuruus 3 | Tarvittavan etäisyyden pitäminen palokaasuihin ja asianmukainen sammutus. (AVD-sammute) |
| 5. Palaneet kaapelit sytyttävät tulipalon seuraavana päivänä, kun aurinko nousee ja sähköistää kaapelit uudelleen. | Mahdollinen | Rakennus syttyy uudelleen palaamaan. Sammutustyöt pitää uudelleen aloittaa Riskin suuruus 3/4 | Tulipalon jälkeen aurinkopaneeleille menevien kaapeleiden tarkastus silmämääräisesti tai sähköpuolen ammattilaisen tarkastus. |

Kun toimenpiteet on suoritettu. Riskin suuruus pienenee tai katoaa kokonaan. Alla on kirjattu ylös opinnäytetyössä esiintyvät riskit.

| | | |
|---------|---------------|-----------------------|
| Kohta 1 | riski Ennen 5 | Jälkeen 4 |
| Kohta 2 | riski Ennen 3 | Jäännösriskiä ei ole. |
| Kohta 3 | riski Ennen 4 | Jäännösriskiä ei ole. |
| Kohta 4 | riski Ennen 3 | Jälkeen 1 |
| Kohta 5 | riski Ennen 3 | Jälkeen 2 |

5.3 Syttymisturvallisuus

Kun Aurinkosähköjärjestelmä rakennetaan, mitoitetaan, suunnitellaan sekä tarkastetaan määräysten ja standardien mukaisesti (esimerkiksi SFS 6000 ja SFS-607) järjestelmien itse syttyminen pienenee. Aurinkopaneelijärjestelmien rakentamiseen liittyen huomioitavaa olisi, että kaikki liitännät tarkistetaan olevan tiukasti kiinni, koska on selvinty, että löysät liitokset ovat aiheuttaneet tulipaloja (Rasinkoski 2020).

Jos akustoja asennetaan järjestelmiin niin asianmukaiset huolto-ohjeet akkuihin ja akkujen vaihtaminen eliniän täytyessä. Nämä myyjältä tai valmistajalta. Koitetaan välttää turhia kytkentöjä ja saada suurin mahdollinen veto kaapeleiden kanssa. Erityisen tärkeää olisi että, aurinkopaneelilta tulevien kaapelien veto tehtäisiin ajatuksella välttämällä reittejä, joissa voisi mahdollista saada osumaa tai jälkiremonteissa kolhiutumia. Nämä voivat myöhemmin johtaa valokaareen ja aiheuttaa tulipaloja. Tässä voisi myös ajatella putkitusta aurinkopaneelille.

Kaapeleiden asianmukainen kiinnitys on tärkeää ja valmistajan ohjeiden noudattaminen. Varoitus tarrojen/kylttien lisääminen. Paloriskiä pienentää asentamalla aurinkopaneelien johdot ja liittimet irti katosta. Tämä estää mekaanista vaurioitumista ja minimoi paloriskiä, jos kuuma piste syntyy valokaaren johdosta.

Huomioitavaa tässä on myös se, että vikakytkennät, jotka ovat aiheuttaneet tulipaloja eivät näy välttämättä heti vaan voivat myöhemmin näkyä, kun aurinkopaneelit saavat parhaan mahdollisen energian esimerkiksi kesäkuussa voivat syttyä aikaisempaakin.

Euroopassa ei vielä aurinkosähköjärjestelmiin liittyen standardia valokaarien ehkäisytystä varten, mutta joitakin valmistajilta löytyy jo isoimpiinkin järjestelmiin tämä kyseinen toiminta esimerkiksi SolarEdge. Yksi suurimmista syistä tulipaloihin on ollut huonot kytkennät. SolarEdge optimizerilla on helppo yhdistää johdot keskenään ja saada hyvät liitokset. AFCI piirillä varustettuna järjestelmä sammuttaa virran kulun eteenpäin kytkentärasialta (optimizer) varokaaren syttyessä, joka pienentää tulipalon riskiä. Myös SolarEdgen yksi toiminnoista on, että invertterien sammussa DC puolella kytketyt (optimizer) sammuvat samalla ja virrankulku estyy. Tämä on hyvä toiminto ajatellen palokuntaa koska tulipalon tilanteessa saadaan virrankulku aurinkopaneelista estettyä (tulipalossa vaurioituneiden optimizereita ei ole tutkittu, johtavatko sähköä). Tämän tapaiset järjestelmät pienentävät paloriskiä (Solaredge 2021).

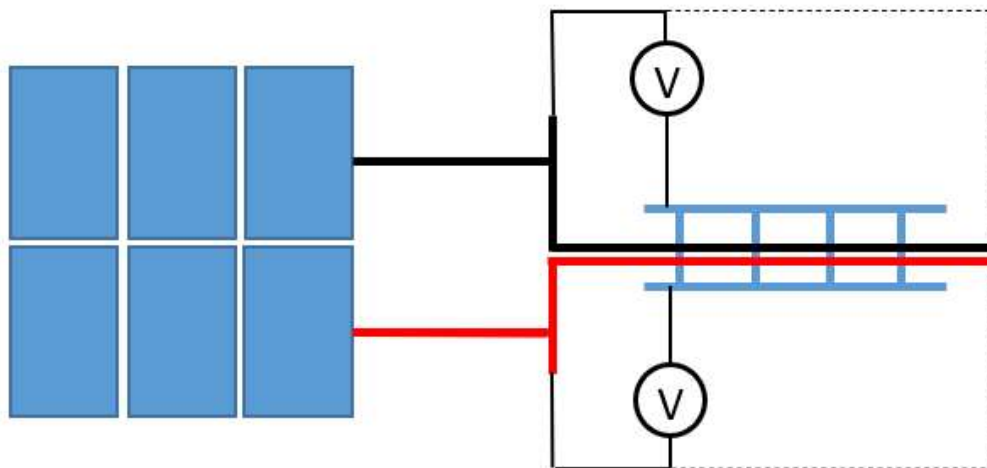
6 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN POLTTAMINEN JA SIIHEN LIITTYVÄ TUTKIMISLAITTEISTO

Suunnittelimme PV-Palo hankkeessa järjestelmää millä saisimme tutkittua aurinkojärjestelmän polttamisessa turvallisuus riskejä. Käytössämme oli Sunny Boy, invertteireitä ja aurinkopaneeleita, joita oli tarkoituksena polttaa tutkimusta varten. Palokunnan valvomassa ympäristössä. Työn mittausjärjestelmän suunnittelu kuului minun opinäytetyöhöni. Labrassa testasimme invertterin kytkentää ja saimme siihen kuntoon, että kun polttoharjoitus suorittaminen on mahdollista sen voi käydä tekemässä.

Koko mittausjärjestelmän toimivuuden selostus. Kuva 15 näkyy kytkentäkuva, jossa on tarkoituksena mitata aurinkopaneelien jännitettä (+ ja - välillä), jännite-eroa (+ ja maan välillä), jännite-eroa (- ja maan välillä). Aurinkopaneelien virtaa mitataan BMV 712 laitteella. Näin kun mitataan, saadaan tietoa aurinkopaneelien välillä tapahtuvista muutoksista ja niitä tutkimalla saadaan selville vikamekanismeja, joita tapahtuu tulipalojen aikana. Invertteriltä eteenpäin tapahtuva virran, jännitteen, eristysresistanssin mittaus tapahtuu analysaattorin kautta. Tähän kytkentään voidaan liittää myös sähkölaitteita tai halutessa kytkeä verkkoon syöttämään virtaa. Mahdollisesti tulossa myös lämpötilanmittaukset mukaan. Katso myös kuva 16 hahmoittelukuva.

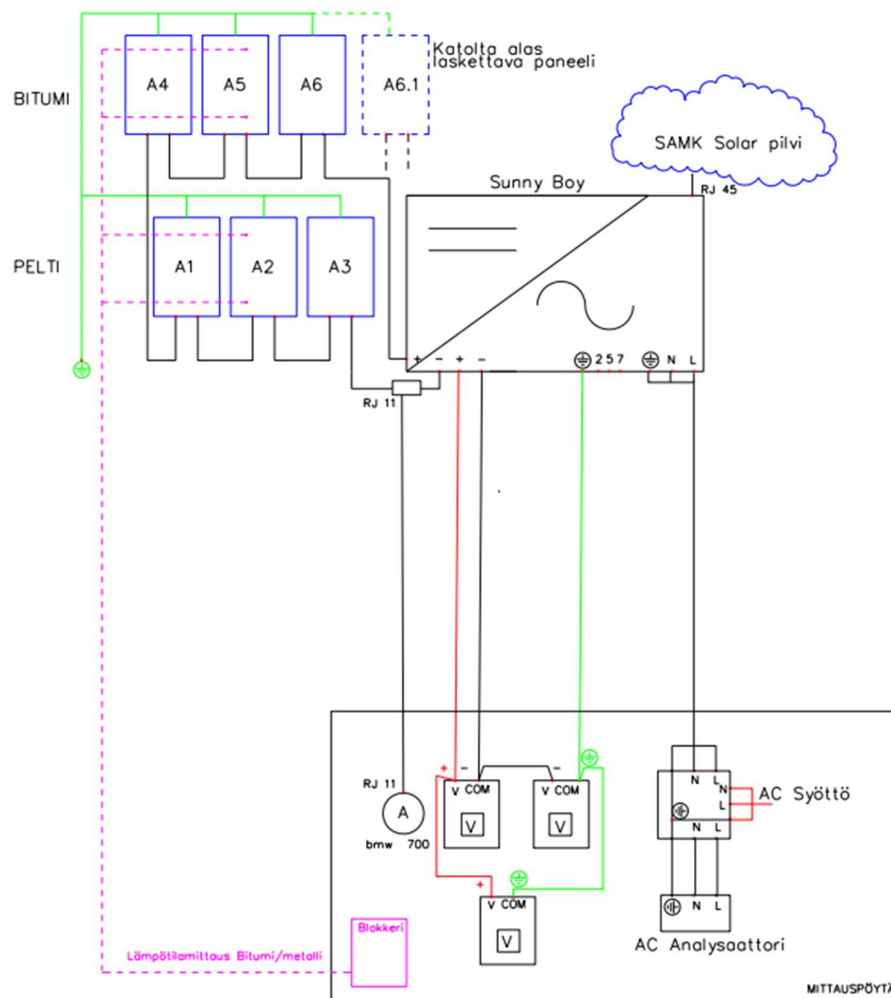
Alustava järjestys polttopaikalla

1. Kaapeleiden poltto hyllynpätkässä. Aurinkopaneeleita kytkettynä 4–12 kappaletta. Tässä on tarkoituksena tutkia valokaaren syntymistä, kaapeleiden hitsautumista ja jännitteen mittausta. Polton jälkeen tarkoituksena tutkia voivatko vaurioituneet kaapelit sytyttää palavaa materiaalia. Katso havainnointikuva 14 ja hahmottelu kuva 16.



Kuva 14. Havainnointikuva (Lähde 2021).

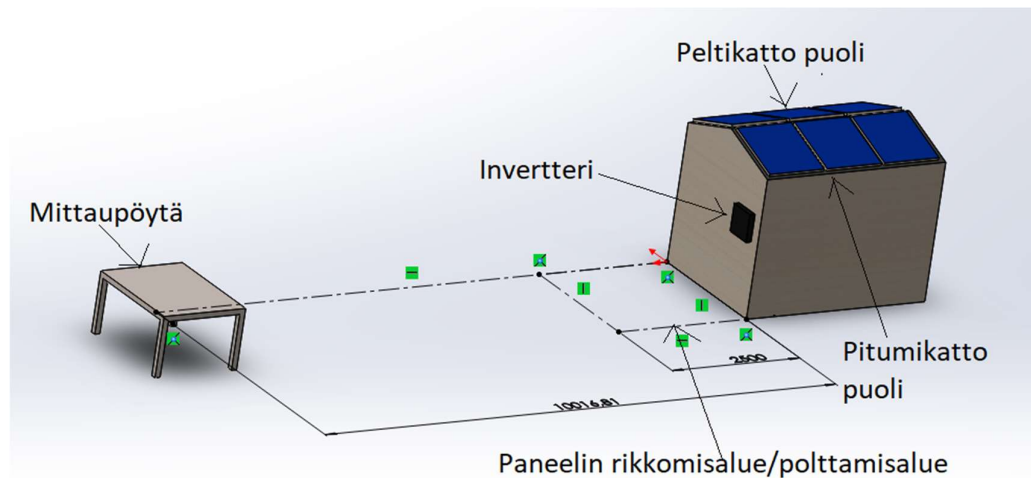
2. Järjestelmästä rikotaan yksi paneeli. Vaihetaan uusi tilalle jälkeen. Tässä myös tarkkaillaan mitä muutoksia paneelin rikkominen aiheuttaa. Kytkeä kuva 15 on tässäkin pohjana. Katso sivu 28 tarkempaa selostusta varten.



Kuva 15. Aurinkosähköjärjestelmä tutkimuslaitteisto kytkentäkuva.

3. Järjestelmästä poltetaan yksi paneeli. Vaihdataan uusi tilalle jälkeen. Tässä myös tarkkaillaan mitä muutoksia paneelin rikkominen aiheuttaa. Kytkentä kuva 15 on tässäkin pohjana. Katso sivu 29 alku tarkempaa selosta varten.

4. Koko Aurinkosähköjärjestelmä poltetaan. Aloitetaan poltto invertterin sijaintiin nähden vastakkaisesta päästä, jolloin invertteri palaa viimeisenä ja siten saadaan erittäin hyvä kuva jokaisen komponenttien vikamekanismeista. Kuva 16 paneelien poltto.



Kuva 16. Paneelien poltto hahmoittelukuva.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aurinkosähköjärjestelmien määrä kasvaa tulevaisuudessa. Tämä on luonut tarpeen selvittää vikamekanismien syiden selvittämistä. Vikamekanismien syiden selvittäminen auttaa meitä turvallisimpiin aurinkosähköjärjestelmiin. Aurinkojärjestelmien huolellinen suunnittelu ja asianmukainen asennus auttaa meitä vähentämään palo ja sähköiskun vaaran riskiä.

PRONTO järjestelmään pitää kerätä parempi dokumentointia liittyen aurinkopaneelijärjestelmien syytymissyiden selvittelyyn. Valokuva syytymiskohdasta, jos todetaan aurinkopaneelin aiheuttama tulipalo. Tällä tavoin saadaan markkinoilta pois komponentteja, jotka voivat aiheuttaa tulipaloja. Sama koskien akustoihin. Uskoisin akustojen yleistyvän heti kun hinnat putoavat kannattavuuden puolelle.

Aurinkopaneelien läheisyyteen pitää saada virrankatkaisu. Tämän toteutuminen olisi esimerkiksi pienelektronikalla toteutettu. Markkinoilla yhtenä vaihtoehtona on Solaredge. Solaredgellä on toiminto, joka antaa mahdollisuuden katkaista virran kulku paneelien lähistöstä (optimizerilta), kun invertteriltä sammuu sähkö. Tämä ratkaisu antaa mahdollisuuden tulipalotilanteessa tehdä aurinkopaneelijärjestelmistä turvallisempia.

Järjestelmän suunnittelu pitäisi toteuttaa myös siten, että pienelektroniikka olisi helpposti vaihdettavissa.

Koska Euroopassa ei vielä ole valokaaren estämiseen liittyvää standardia sen lisääminen edesauttaisi aurinkopaneelijärjestelmien kehitystä parempaan suuntaan. Tämä on tärkeää, koska aurinkopaneelijärjestelmissä suurin palon aiheuttama syy on valokaaren muodostama tulipalo. AFCI toimii niin, että havaitsee valokaaren ja sammuttaa DC puolen (kytkentärasiaassa, joka on yleensä paneelien vieressä).

LÄHTEET

Ahoranta, J. 2017. Sähkötekniikka. WSOY: Helsinki.

Ala-Myllymäki, E. 2016. Aurinkodemo. Oy Merinova ab. Nettijulkaisu. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/09/aurinkodemo_loppuraportti.pdf. Viitattu 18.05.2021.

Ala-Princkilä, M. 2016. Nettijulkaisu. <https://www.kiinteistolehti.fi/aurinkopaneeleista-syntyi-julkisivu>. Viitattu 18.05.2021

Aurinkosähkö. 2021. Lataussäätimet. Nettijulkaisu. <https://www.aurinkosahko.net/category/11/lataussaatimet>. Viitattu 18.05.2021

Avitor. 2021. Aurinkosähkö. Nettijulkaisu. <https://www.avitor.fi/aurinkosahko.html>. Viitattu 18.05.2021

Erat, B. Erkkilä, V. Nyman, C. Peippo, K. Peltola, & Suokivi, H. 2018. Aurinko-opas aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Aurinkoteknillinen Yhdistys ry.

Euroopan komissio. 2020. Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä. Nettijulkaisu. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>. Viitattu 18.05.2021

Huttu, I. Heiskanen, P. Öhman, L. Suominen, A. Mäkelä, M. Savolainen, M. Uurasmaa, P. Niemi, P. Ström, J. 2016. Palo- ja pelastusalan sähköturvallisuus. Koulutusmateriaalia pelastustoimen käyttöön. <https://edu.spek.fi/koulutus/zine/163/article-6217>. Viitattu 18.05.2021

Kuismanen, M. 2019. Aurinkosähköjärjestelmien huomioiminen pelastustoiminnassa. Pelastusopisto. Kehittämishanke.

Lehto, I. Liuksiala, L. Lähde, P. Olenius, M. Orrberg, M. Ylinen, M. 2017. Aurinkosähkölaitteiden suunnittelu ja toteutus. Sähköinfo Oy: Espoo.

Lehtonen, P. 2019. Aurinkopaneelien markkinointi ihmetyttää: mikä ihmeen kWp. Kuluttaja. Artikkelit. Nettijulkaisu. <https://kuluttaja.fi/artikkelit/aurinkopaneelien-markkinointi-ihmetyttaa-mika-ihmeen-kwp>. Viitattu 18.05.2021

Läderberg, V. 2020a. Aurinkosähkölaitteiden riskit pelastustoimelle. Powerpoint esitys.

Läderberg, V. 2020b. Aurinkosähkölaitteiden riskit pelastustoimelle. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201704124725>. Viitattu 18.05.2021

Motiva, 2020. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Nettijulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Viitattu 18.05.2021

Paavola, M. 2013. Verkkoon kytkettyjen aurinkosähkölaitteiden potentiaali Tampereella. Diplomityö. https://www.motiva.fi/files/10884/Verkkoon_kytettyjen_aurinkosahkojarjestelmien_potentiaali_Tampereella_Minna_Paavola_Diplomityo.pdf. Viitattu 18.05.2021

Perälä, R. 2017. Aurinko-Sähköä. Karisto oy: Helsinki.

Rasinkoski, A. 2020. Aurinkosähkölaitteiden paloriskit ja sammutusturvallisuus. Kirjallisuusselvitys ja näkemys suomen tilanteeseen 2019. Nettijulkaisu. Aurinkosähkölaitteiden paloriskit ja sammutusturvallisuus.pdf (motiva.fi). Viitattu 18.05.2021

Ruunula www-sivut. 2019. Nettijulkaisu. <https://www.ruunula.fi/template/pages/station/climate.php?var=S>. Viitattu 18.05.2021

Saarelma, O. 2021. Terveyskirjasto. Sähkön aiheuttamat vammat (sähköisku). Nettijulkaisu. http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00334. Viitattu 18.05.2021

Salo, V-M. 2014. Opinnäytetyö. Siirrettävän varavoimalaitteen käyttöturvallisuuden tutkiminen. Nettijulkaisu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201404244855>. Viitattu 18.05.2021

Sammutinpalvelu. 2021. AVD litiumpalosammutin. Nettijulkaisu. <https://www.sammutinpalvelu.fi/tuotteet/litiumpalosammuttimet/>. Viitattu 18.05.2021

Solarforum. 2011. Porin uimahalli. Nettijulkaisu. <https://solarforum.fi/wp/fi/seuranta-kohteet/porin-uimahalli/>. Viitattu 18.05.2021

Solaredge. 2021. Solar Power Harvesting, Optimization and Monitoring System. Nettijulkaisu. https://www.solaredge.com/us/products/overview#/. Viitattu 18.05.2021

Svarc, J. 2020 Solar panel construction. Clean energy reviews. Nettijulkaisu. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. Viitattu 18.05.2021

Tahkokorpi, M.2016.AurinkoEnergia Suomessa. Into kustannus: Helsinki.

VTT Oy. 2009. Riskien suuruuden arviointi. PK-RH. Nettijulkaisu. <http://virtual.vtt.fi/virtual/pkrh/startti-riskienhallintaan/mita-riskienhallinta-on/riskien-suuruuden-arviointi/riskien-suuruuden-arviointi/index.html>. Viitattu 18.05.2021

Wikipedia. 2020. Luettelo Suomen suurimmista aurinkovoimaloista. Nettijulkaisu. https://fi.wikipedia.org/wiki/Luettelo_Suomen_suurimmista_aurinkovoimaloista. Viitattu 18.05.2021

Ylinen, M. 2021. Lehtori, Satakunnan ammattikorkeakoulu. Pori. henkilökohtainen tiedonanto. 15.4.2021.

Lähde, P. 2021. Tutkija. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Pori. 13.4.2021.