



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU OPETUSKÄYTTÖÖN

TEKIJÄ: Olli Lappalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Olli Lappalainen			
Työn nimi Verkkoon kytkettävän aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu opetuskäyttöön			
Päiväys	8.5.2014	Sivumäärä/Liitteet	56/4
Ohjaaja(t) lehtori Jari Ijäs, yliopettaja Juhani Rouvali			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Koulutus- ja kehittämispäällikkö Esko Pöllänen			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin aurinkosähkön hyödyntämiseen Suomen olosuhteissa sekä sen käytön tutkimiseen opetuskäytössä. Työssä suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä on tarkoitus asentaa Savonia-ammattikorkeakoulun Opistotien yksikön päärakennuksen katolle lähitulevaisuudessa. Lisäksi tässä työssä on myös esitelty tietoa muun muassa aurinkosähkötekniikan käytön nykytilasta sekä mahdollisista tulevaisuuden näkymistä.</p> <p>Työssä tutustuttiin ensimmäisessä vaiheessa markkinoilla oleviin erilaisiin aurinkosähköjärjestelmiin sekä niissä käytettäviin komponentteihin. Oleelliset huomioon otavat seikat työssä olivat sopivien aurinkopaneelien sekä järjestelmässä käytettävän verkkoinvertterin valinta. Järjestelmässä päädyttiin lopulta käyttämään hinnan ja paneelien perusteella monikiteisestä piistä valmistettuja puolijohdeaurinkopaneeleita, sillä ne ovat hyötysuhteeltaan hintaansa nähden tässä työssä suunniteltuun järjestelmään kaikkein käytännöllisimpiä. Ohutkalvopaneelien käyttö olisi tosin ollut toiminnan tarkkailun kannalta parempi ratkaisu niiden ominaisuuksien ansiosta, mutta niiden käyttö ei olisi ollut taloudellisesti kovinkaan kannattavaa. Lähitulevaisuudessa tilanne olisi kuitenkin voinut muuttua aurinkotekniikan kehittyessä ja komponenttien kustannusten laskiessa jatkuvasti.</p> <p>Työn tuloksena voitiin todeta, että aurinkosähköjärjestelmien nykytarjonta on jo melko monipuolista ja erilaisia järjestelmiä ja asennusmahdollisuuksia on paljon. Lisäksi huomattiin, että toimivan aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa täytyy ottaa huomioon käytännössä monia seikkoja, kuten perehtymistä aurinkosähköjärjestelmiä koskevaan lainsäädäntöön.</p>			
Avainsanat aurinkosähkö, aurinkopaneeli, aurinkosähköjärjestelmä, invertteri, tasajännite, vaihtojännite			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Olli Lappalainen			
Title of Thesis Planning of the Grid-Connected PV System for Teaching Purposes			
Date	8 May 2014	Pages/Appendices	56/4
Supervisor(s) Mr. Jari Ijäs, Lecturer, Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Mr. Esko Pöllänen, Head of Engineering and Technology, Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study the utilization of photovoltaic (PV) technologies in Finland and to plan a suitable grid-connected PV system for Savonia University of Applied Sciences. The installation of the system is planned to be done in the near future. The purpose was also to study for example the present state of PV systems and their possible future solutions.</p> <p>The first thing in this thesis was to take a look at the present PV systems and the components which are used in these systems. The most important thing was to pick a suitable inverter and PV modules. The outcome was to use polycrystalline PV modules based on the price of the modules. The qualities of the thin film modules would have been better from the point of view of the utilization of the system, but the utilization of those kind of modules would not have been financially very profitable. The situation may change in the near future, because the prices of PV systems are constantly getting lower and the solar technology develops all the time.</p> <p>As a result of this thesis it can be concluded that the selection of different kind of PV systems is already quite wide and versatile. During the thesis process it could be discovered that the planning of the grid-connected PV system requires a lot of thinking about how things must be done and what kind of things have to be taken into account in the planning process.</p>			
Keywords AC, DC, OFF-grid, Grid-connected, PV modul, monocrystalline, polycrystalline, thin film, inverter			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoululle tekniikan yksikköön. Työn aiheena oli suunnitella verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä asennettavaksi koululle lähinnä opetuskäyttöön. Aiheena aurinkosähkön tutkiminen ja sen hyödyntäminen on hyvin ajankohtainen, sillä uusien luonnonvarojen hyödyntämistä joudutaan väistämättä lisäämään huomattavasti lähitulevaisuudessa. Opinnäytetyö suoritettiin kevään 2014 aikana, mutta sen perusteella suunnitellun aurinkosähköjärjestelmän asennus tapahtuu vasta myöhemmin eikä asennusvaihetta sen takia ole käsitelty tarkemmin tässä työssä.

Haluan kiittää erityisesti ohjaajaani, lehtori Jari Ijästä sekä yliopettaja Juhani Rouvalia aiheen kehittämisestä sekä työn ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää oppilaitoksen sähkölaboratorion laboratorio-mestaria Jukka Rantalaa avusta etenkin työn suunnitteluvaiheessa.

Kuopiossa 16.4.2014

Olli Lappalainen

LYHENTEET JA KÄSITTEET

a-Si	Amorfinen pii (Amorphous Silicon)
CdTe	Kadmium-telluuri (Cadmium Telluride)
CIGS	Kupari-indium-gallium-diselenidi (Copper Indium Gallium Diselenide)
CIS	Kupari-indium-diselenidi (Copper Indium Diselenide)
$I_{SC\ STC}$	Oikosulkuvirta standardiolosuhteissa
W	Watti
Wp	Watt-peak, aurinkopaneelin sähköntuotannon nimellisteho standardiolosuhteissa, kun paneeliin kohdistuu $1\ 000\ W/m^2$ säteilyteho
μc -Si/a-Si	Mikromorfiininen kaksoiskenno, amorfisesta piistä ja mikrokiteistä koostuva ohutkalvopaneelityyppi (Micromorphous tandem cell)

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	PROJEKTIN TAVOITTEET	10
2.1	Aurinkovoiman hyödyntäminen	11
2.2	Projektin eteneminen	11
3	AURINKO ENERGIANLÄHTEENÄ.....	13
4	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT	14
4.1	Akullinen järjestelmä	14
4.1.1	Järjestelmän toiminta	14
4.1.2	Järjestelmän käyttösovellukset.....	16
4.2	Verkkoon kytkettävä järjestelmä	16
4.2.1	Järjestelmän toiminta	16
4.2.2	Järjestelmän käyttösovellukset.....	17
4.3	Muita aurinkosähköjärjestelmätyyppejä	18
5	VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	19
5.1	Aurinkopaneelit.....	19
5.1.1	Puolijohdepaneelit.....	21
5.1.2	Ohutkalvopaneelit	23
5.1.3	Moniliitospaneelit	25
5.2	Vaihtosuuntaaja	25
5.2.1	Vaihtosuuntaajan toiminta	25
5.2.2	Vaihtosuuntaajan käyttö	26
5.3	Verkkoon kytkettävän järjestelmän suojaus	27
5.3.1	Ukkossuojaus.....	27
5.3.2	Kaapelisuojaus.....	28
5.3.3	Saarekekäytön estäminen	28
5.3.4	Tarpeeton erottaminen sähköverkosta.....	29
5.3.5	Vikavirtasuojauksen hidastuminen.....	29
5.3.6	Vaikutus pikajälleenkytkentöihin.....	30
5.3.7	Muita suojausvaatimuksia	30
5.4	Verkkoon kytkettävän aurinkosähköjärjestelmän kaapelointi	30
6	JÄRJESTELMÄN LIITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON.....	33

6.1	Luvat ja asiakirjat	33
6.2	Liittymiskustannukset	34
6.3	Siirtomaksut	34
6.4	Tariffit	34
6.5	Järjestelmän suojaus	35
6.6	Mittaus	35
7	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN ASENNUS JA KUSTANNUKSET	36
7.1	Kiinnitystelineet ja –jalustat	37
7.1.1	Kiinteät kattotelineet	38
7.1.2	Säädettävät telineet	38
7.1.3	Aurinkoa seuraavat telineet	38
7.2	Kustannukset	39
7.2.1	Asennuskustannukset	39
7.2.2	Järjestelmien takaisinmaksuajat	40
8	VERKKOON KYTKETTÄVÄN JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU OPETUSKÄYTTÖÖN	42
8.1	Järjestelmätyypin valinta	42
8.2	Standardit, lait ja määräykset	42
8.3	Järjestelmän mitoituksen perusteet	44
8.4	Järjestelmän pääkomponenttien valinta sekä asennuksen suunnittelu	46
8.5	Lopulliset valinnat ja päätökset järjestelmästä	47
8.6	Suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä	47
8.6.1	Invertteri ja aurinkopaneelit	48
8.6.2	Kaapelointi ja järjestelmän suojaus	49
8.6.3	Asennustarvikkeet ja etäyhteys	50
9	VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN TESTAUS	51
9.1	Testaus	51
9.2	Testaukseen liittyvät standardit	52
10	YHTEENVETO	53
	LÄHTEET	54
	LIITE 1: VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN PERIAATEKAAVIO	57
	LIITE 2: 2 KWP VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT JA KAAPELOINNISSA ESIINTYVIEN HÄVIÖIDEN ARVIO	58

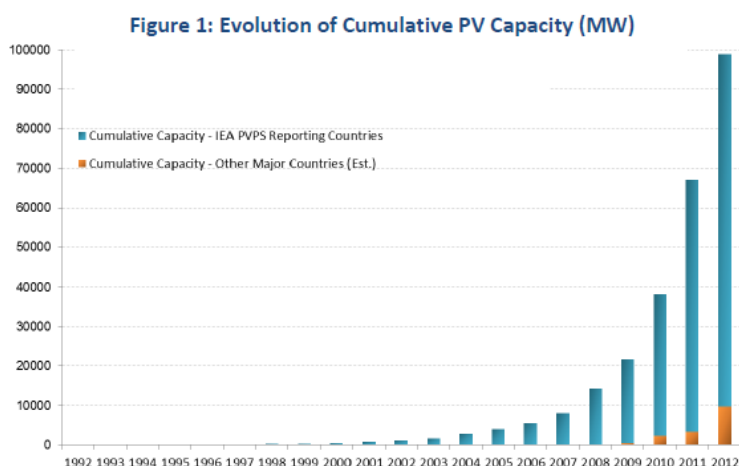
LIITE 3: 2 KWP:N AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN PERIAATEKAAVIO.....	59
LIITE 4: MITTAKUVA AURINKOPANEELISTOSTA	60

1 JOHDANTO

Aurinkoenergian käyttö on lisääntynyt viime vuosina jatkuvasti, ja sen käyttö tulee todennäköisesti väistämättä yleistymään jatkossakin teknologian kehittyessä ja luonnonvarojen, kuten maailman öljyvarojen ehtyessä. Suomi ei kuitenkaan ole aurinkoenergian hyödyntämiseen kaikkein otollisin paikka maantieteellisen sijaintinsa takia, vaikka täälläkin aurinkoenergiaa pystytään hyödyntämään. Lähellä päiväntasaajaa saadaan auringosta luonnollisesti kuitenkin paljon enemmän hyötyä kuin Suomessa, sillä aurinko paistaa siellä ympäri vuoden tasaisesti ja korkealta. Aurinkoenergian hyödyntämismahdollisuudet ovat todella monipuoliset, sillä järjestelmiä voidaan asentaa erilaisiin käyttötarkoituksiin monenlaisiin kohteisiin ja paikkoihin.

Suomessakin aurinkoenergiasta saadaan kuitenkin paljon hyötyä ja sen käyttö on lisääntynyt viime vuosina huomattavasti. Ensisijaiset käyttökohteet aurinkosähköjärjestelmille Suomessa ovat vapaa-ajan asunnot sekä omakotitalot. Erilaisten aurinkosähköjärjestelmien yleistyminen vuosien saatossa on todennäköisesti johtunut pitkälti järjestelmässä tarvittavien komponenttien halpenemisesta ja tulevaisuudessa niiden hinnat todennäköisesti laskevat edelleen. Hintojen lasku luonnollisesti parantaa aurinkosähköjärjestelmien kilpailukykyä sähköntuotannossa sekä lyhentää järjestelmien takaisinmaksuaikoja.

Eurooppa on suurin aurinkoenergiaa hyödyntävä markkina-alue maailmassa. Vuonna 2012 aurinkosähköjärjestelmillä tuotettu yhteenlaskettu kokonaisteho koko maailmassa oli jo noin 100 GW, kun esimerkiksi vielä vuonna 2010 se oli vain noin 35 GW, kuten kuvioista 1 huomataan. Euroopan hallitsevan markkina-aseman suurena syynä on todennäköisesti Euroopan Unionin asettamat päästövaikeudet. EU:n energiapolitiikan mukaan tavoitteena olisi pienentää vuoteen 2020 mennessä kasvihuonepäästöjä 20 %. Samalla energiatehokkuutta tulisi parantaa 20 % sekä lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä 20 %. EU:ssa kyseistä tavoitetta kutsutaan ”20-20-20-tavoitteeksi”. Yksittäisenä maana Saksa on suurin aurinkoenergian käyttäjä maailmassa (vuonna 2012), mutta esimerkiksi Italia ja Kiina ovat alkaneet kuroa eroa kärkeen kiinni. (IAE 2013; Energiateollisuus 2011.)

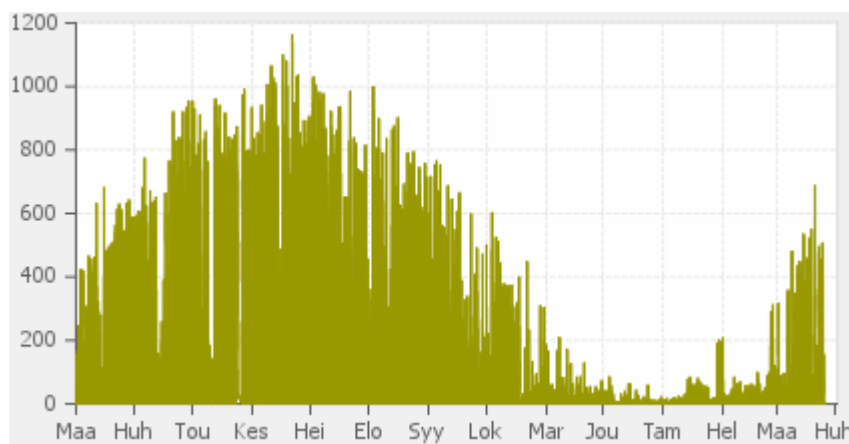


KUVIO 1. European Photovoltaic Industry Associationin (EPIA) raportoima aurinkosähköjärjestelmien tuottama sähköteho koko maailmasta vuosilta 1992 - 2012 (IEA 2013.)

2 PROJEKTIN TAVOITTEET

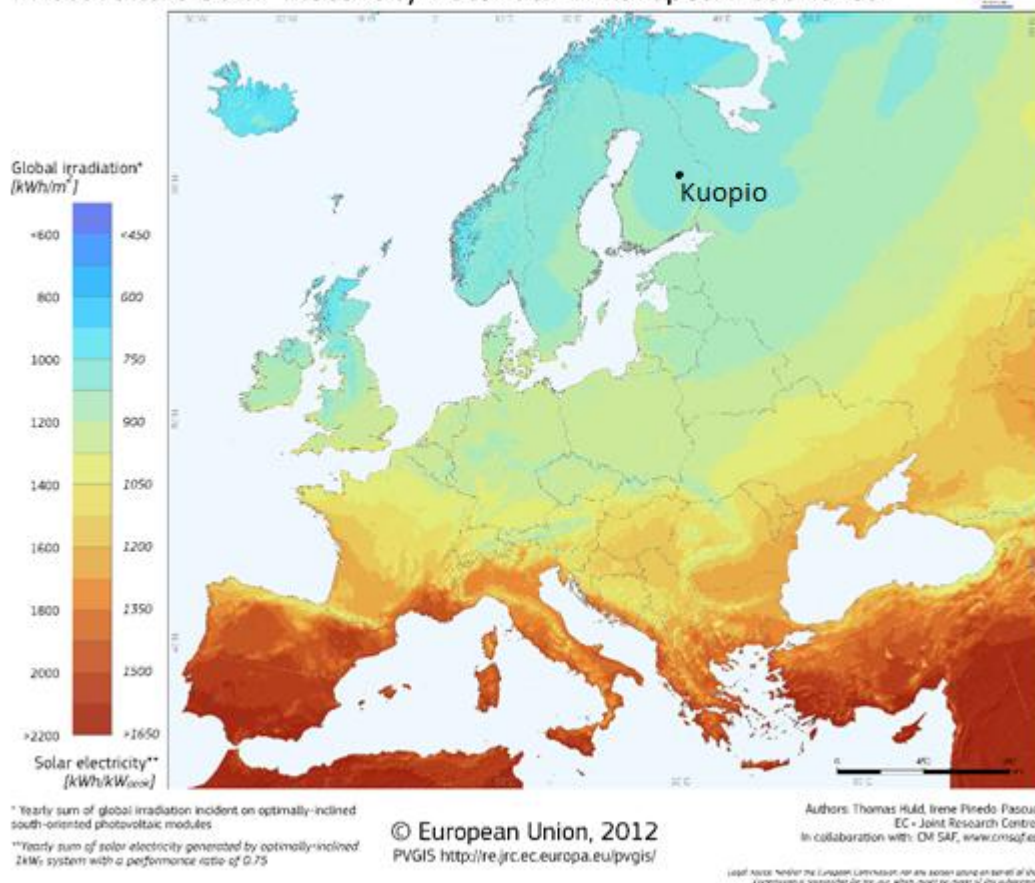
Opinnäytetyön aihe lähti liikkeelle Savonia-ammattikorkeakoulun projektikurssista, joka alkoi syksyllä 2013. Kurssilla oli tarkoitus tutustua erilaisiin aurinkosähköjärjestelmiin ja valita esimerkkijärjestelmä asennettavaksi koululle. Järjestelmän suunnitteluvaiheista tehtiin kurssilla yleinen verkkoon kytkettävän aurinkosähköjärjestelmän suunnitteluohje, jonka avulla lähes maallikkokin voi suunnitella omaan käyttöönsä sopivaa verkkoon kytkettävää aurinkosähköjärjestelmää. Projektista opinnäytetyö laajentui järjestelmän lopulliseen suunnitteluun, komponenttien hankintaan ja järjestelmän testaamisen suunnitteluun käytännössä. Tämän lisäksi aiheesta laadittiin laboratoriotyö sähkötekniikan laboratorioskurssille opetuskäyttöön. Järjestelmässä käytettyjen asennustelineiden suunnittelu toteutettiin yhdessä Savonia-ammattikorkeakoulun konetekniikan osaston opiskelijoiden kanssa.

Opinnäytetyön tuloksena suunnitellulla verkkoon kytkettävällä aurinkosähköjärjestelmällä olisi tarkoitus tutkia energiantuotantotehokkuutta eri vuodenaikoina ja erilaisilla aurinkopaneelien suuntauksilla. Haasteena työssä oli Suomen maantieteellinen sijainti, sillä varsinkin opetuskäytössä paneelien testaaminen tuottaa suuria haasteita, koska paras tehontuotanto eli suurin auringonsäteilyn määrästä saatava hyöty ajoittuu loppukevään ja alkusyksyn välille. Muina vuodenaikoina toiminnan tarkkailussa ei huomata kovinkaan suuria eroja, koska aurinkon säteilymäärät ovat huomattavasti pienempiä kuin kesäaikaan. Kuviossa 2 on esitetty auringon säteilytehon muutosta Kuopiossa vuosien 2013 ja 2014 välillä ja kuvassa 1 on esitetty auringonsäteilyn määriä sekä aurinkosähkön tuotannon potentiaalia eri puolilla Eurooppaa. Kuvasta 1 myös nähdään, että Kuopio, kuten suurin osa Suomesta, on auringonvalaistuksen suhteen vyöhykkeellä, jossa aurinkosähköntuotanto on parhaimmillaan noin 825 kWh/kWp vuodessa. Lisäksi tässä opinnäytetyössä tutustuttiin muun muassa aurinkosähköjärjestelmän hankinta- ja ylläpitokustanuksiin, suojaukseen sekä järjestelmien takaisinmaksuaikoihin.



KUVIO 2. Auringon säteilyteho (W/m^2) Kuopiossa vuosien 2013 - 2014 välillä Suomen sääpalvelun mukaan (Suomen sääpalvelu 2014.)

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



KUVA 1. Auringon säteilyteho ja aurinkosähkötuotantopotentiaali Euroopassa (PVGIS 2012.)

2.1 Aurinkovoiman hyödyntäminen

Aurinkoenergia on käyttökelpoinen ja todella potentiaalinen uusiutuvan energianlähde jo nyt, ja tulevaisuudessa sen merkitys tulee todennäköisesti vain kasvamaan. Aurinkoenergian hyödyntäminen perustuu auringon säteilyenergian muuttamiseen lämpö- tai sähköenergiaksi. Auringon säteilyteho muutetaan sähköksi yleensä aurinkopaneelien avulla ja lämmöksi aurinkokeräimillä. Suuria aurinkovoimaloita on rakennettu ympäri maailman ja uusia suunnitellaan ja rakennetaan jatkuvasti.

2.2 Projektin eteneminen

Projekti alkoi erilaisiin aurinkosähköjärjestelmiin tutustumisella, minkä perusteella valittiin sopiva järjestelmä toteutettavaksi. Seuraava vaihe oli perehtyä siihen, tuleeko järjestelmän toteuttaminen halvemmaksi ostamalla koko järjestelmä pakettina vai kannattaako järjestelmässä tarvittavat komponentit tilata erikseen. Nopeasti huomattiin, että komponenttien tilaaminen erikseen tulee halvemmaksi ja siten järjestelmää pystytään muokkaamaan paremmin käyttötarkoitukseen sopivaksi. Lisäksi etuna oli se, että järjestelmän toteuttamiseksi voitiin paremmin hyödyntää Savonia-ammattikorkeakoulun opiskelijoiden panosta järjestelmän suunnittelussa.

Hankkeen budjetin selvittyä valittua aurinkosähköjärjestelmää alettiin käytännössä suunnitella. Suunnittelun päävaiheet on esitetty myöhemmin tarkemmin luvussa 8. Suunnitteluvaihe jakautui kuitenkin pääpiirteittäin kaapeloinnin ja suojauksen mitoittamiseen ja valintaan sekä muutenkin sopivien järjestelmäkomponenttien valintaan.

Suunnitteluvaiheen ollessa loppusuoralla järjestelmään tilattiin osa tarvittavista järjestelmäkomponenteista tarjouspyyntöjen perusteella. Suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut voivat tietenkin vielä hiukan muuttua käytännössä, sillä tämän opinnäytetyön aikana järjestelmän lopullista rakentamista ei vielä toteutettu eikä kaikkia järjestelmäkomponentteja, kuten kaapeleita, vielä tilattu. Järjestelmälle haettiin myös rakennuslupaa ennen komponenttien tilaamista.

3 AURINKO ENERGIANLÄHTEENÄ

Aurinko on noin 4,6 miljardia vuotta vanha kaasupallo, joka koostuu lähinnä vedystä ja heliumista. Se pysyy koossa pääasiassa oman painonsa ansiosta. Auringon säteilemä energia syntyy sen ytimessä, joka on säteeltään neljäsosa Auringon säteestä. Auringossa tapahtuvassa fuusioprosessissa fuusioituu 600 miljoonaa tonnia vetyä 596 miljoonaksi tonniksi heliumia joka sekunti. Auringon säteilyteho on ajansaatossa kasvanut huomattavasti, sillä 4,5 miljardia vuotta sitten säteilytehon on arvioitu olleen vain 72 % nykyisestä. Säteilytehon on ennustettu kasvavan myös tulevaisuudessa kiihdyttämällä ilmastonmuutosta entisestään meristä haihtuneen vesihöyryn lisääntyessä maapallon ilmakehässä. (Ilmatieteenlaitos 2014.)

Auringon fuusioprosessissa tuottama energia säteilee avaruuteen lähinnä näkyvänä valona ja lämpösäteilyä eli infrapunasäteilyä. Auringon vuontiheys eli säteilyteho on maassa noin $1\,366\text{ W/m}^2$. Kyseistä lukua kutsutaan aurinkovakioksi. Aurinkovakio ei kuitenkaan ole todellisuudessa aivan vakio, sillä Auringon pinnalla esiintyvät aurinkopilkkut vaikuttavat ajoittain hieman sen suuruuteen. Himmeiden aurinkopilkkujen vaikutus aurinkovakioon on kuitenkin todella pieni, sillä niiden vaikutus mitataan tuhannesosien muutoksina aurinkovakiossa. (Ilmatieteenlaitos 2014.)

4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT

Aurinkosähköjärjestelmät jaetaan kahteen päätyyppiin: akullisiin sekä verkkoon kytkettäviin järjestelmiin. Näiden järjestelmätyyppien suurin ero on se, että akullisessa järjestelmässä on nimensä mukaisesti akut, joihin aurinkopaneeleilla tuotettu sähköenergia varataan. Verkkoon kytkettävässä järjestelmässä puolestaan ei ole akkuja, vaan siinä saatu sähköteho syötetään suoraan erilaisten sähkölaitteiden, kuten kodinelektroniikan käyttöön. Molemmissa järjestelmätyypeissä käytetään pääsääntöisesti samoja komponentteja. Suurin ja kallein ero komponenttien osalta järjestelmien välillä on akullisessa järjestelmässä tarvittavat akut. Esimerkiksi jo paneeliteholtaan noin 1,2 kWp:n akullisessa järjestelmässä käytettävät 303 Ah:n akut maksavat nykyhinnoilla yhteensä noin 3 000 €.

Aurinkosähköjärjestelmää valittaessa tärkein valintakriteeri on sen käyttökohde. Esimerkiksi kesämökille, jossa ei ole verkkoyhtiön sähköverkkoliityntää, ainoa mahdollinen järjestelmätyyppi on akullinen järjestelmä. Tällaisessa tilanteessa akustosta saatavaa sähköenergiaa voidaan käyttää suoraan 12/24 V tasajännitteellä (DC) toimivilla laitteilla tai vaihtosuuntaajan avulla 230 V vaihtojännitteellä (AC) toimivia laitteita. Vastaavasti verkkoon kytkettävä järjestelmä soveltuu parhaiten esimerkiksi verkkoyhtiön verkossa oleviin omakotitaloihin, sillä sen avulla voidaan ainakin osittain käyttää rakennuksessa olevia sähkölaitteita ja näin säästää sähkölaskuissa. Verkkoon kytkettävällä järjestelmällä voidaan esimerkiksi pitää kesällä aurinkoisella säällä ilmalämpöpumppua toiminnassa, jolloin rakennuksen jäädyttämisestä ei aiheudu sähkölaskua.

4.1 Akullinen järjestelmä

Akuilla varustettu aurinkosähköjärjestelmä on aurinkoenergian hyödyntämisen perinteinen sovellus, jota on hyödynnetty eri tavoin jo vuosikymmeniä. Ne ovat nykyäänkin yleisiä ja niiden käyttö yleistyy vieläkin jatkuvasti. Järjestelmiin käytettävää teknologiaa kehitetään koko ajan järjestelmien toiminnan ja käytännöllisyyden parantamiseksi. Suurin ongelma akullisten järjestelmien käytönkasvulle on nykyisen akkuteknologian taso. (IAE 2013.)

4.1.1 Järjestelmän toiminta

Akullinen järjestelmä (OFF-Grid) voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: ilman vaihtosuuntaajaa tai sähköpääkeskukseen kytkettävällä vaihtosuuntaajalla. Käytännössä näillä kahdella tavalla toteutettujen järjestelmien suurin ero ovat laitteet, joita järjestelmillä voidaan käyttää. Ilman sähköpääkeskukseen kytkettyä vaihtosuuntaajaa toteutetussa järjestelmässä voidaan käyttää ilman erillisiä vaihtosuuntaajia suoraan vain 12/24 V tasajännitteellä toimivia sähkölaitteita. Tämä asettaa haasteita jo sopivien laitteiden löytämiseksi, sillä esimerkiksi suoraan 12/24 V toimivaa kodinelektroniikkaa on markkinoilla paljon vähemmän kuin normaalilla 230 V vaihtojännitteellä toimivia laitteita. Sopivat laitteet ovat myös kilpailun vähäisyyden takia suhteessa huomattavasti kalliimpia kuin 230 V vaihtojännitteellä toimivat vastaavat laitteet. Järjestelmässä voidaan toki käyttää erillisiä vaihtosuuntaajia,

mutta laadukkaat "erillisinverterit" ovat melko kalliita. Yleisesti ilman vaihtosuuntaajaa toteutettuja järjestelmiä on vain lähinnä esimerkiksi kesämökeillä.

Järjestelmä voidaan kuitenkin "päivittää" myöhemmin syöttämään jopa 3-vaiheista 230 V, 50 Hz vaihtojännitettä kiinteistöön, jolloin voidaan käyttää tavallisia vaihtojännitteellä toimivia laitteita. Järjestelmän päivittäminen myöhemmin sähkökeskukseen kytkettävällä vaihtosuuntaajalla toteutettavaksi voi kuitenkin olla melko kallista, sillä vaihtosuuntaajaan hankkimisen lisäksi voi joutua hankkimaan muun muassa uusia akkuja sekä aurinkopaneeleita järjestelmän sähkötehotarpeesta riippuen. Akkukapasiteetin todennäköinen suurentamistarve johtuu siitä, että akuston jännite täytyy yleensä nostaa vähintään 24 V:iin sarjakytkenällä vaihtosuuntaajan toimivuuden takia, minkä vuoksi myös rinnankytkennässä tarvittavien akkujen määrää täytyy yleensä kasvattaa akkukapasiteetin suurentamiseksi. Aurinkopaneelien lisääminen voi olla välttämätöntä riittävän sähköntuotannon ja siten järjestelmän toiminnan kannalta.

Akullisen aurinkosähköjärjestelmän päätoimintaperiaate on melko yksinkertainen. Aurinkopaneelilta saatava sähköteho siirretään lataussäätimen kautta akustoon. Lataussäädin myös suojaa akkuja virtapiikeiltä akuston yllä latautumisen ehkäisemiseksi. Lisäksi lataussäädin yleensä kykenee irrottamaan kuorman akkujen tyhjentäessä, mikä avulla vältetään akuston syväpurkautuminen. Esimerkiksi liijakuilla syväpurkaus syntyy, jos akkujen varaustila laskee alle 30 %:iin täydestä varauksesta. Akkujen liiallinen tyhjeneminen lyhentää akkujen käyttöikä huomattavasti. Lopuksi akustosta saatava tasasähkö syötetään suoraan 12/24 V sähkölaitteille tai vaihtosuuntaajalle, joka muuttaa sen vaihtosähköksi erilaisille sähkölaitteille. (Saarensilta 2012-12-19.) Akullisen, sähkökeskukseen kytketyn vaihtosuuntaajan avulla toteutetun aurinkosähköjärjestelmän periaatekuva on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Akullisen järjestelmän periaatekaavio (SUNTEKNO 2012.)

4.1.2 Järjestelmän käyttösovellukset

Uutta akullista järjestelmää suunniteltaessa olisi järkevämpää suunnitella järjestelmä, jossa vaihtosuuntaaja on kytketty sähkökeskukseen. Tällainen ratkaisu on tosin huomattavasti kalliimpi kuin ilman vaihtosuuntaajaa toteutettu järjestelmä, sillä sähkökeskukseen kytkettävä vaihtosuuntaaja on yleensä ylivoimaisesti kallein yksittäinen komponentti aurinkosähköjärjestelmissä, vaikkakin iso akusto voi joskus olla vielä invertteriäkin suurempi yksittäinen investointi. Lisäksi tällaisen vaihtosuuntaajan käyttö edellyttää kokonaisteholtaan suurempaa järjestelmää kuin ilman sitä toteutettu järjestelmä, sillä 230 V verkkokäyttöön tarkoitetut vaihtosuuntaajat edellyttävät vähintään 800 W:n tehoista järjestelmää (Eurosolar). Pienemmille tehoille tosin löytyy yksittäisiä 230 V AC sähkölaitteita varten myös erillisiä vaihtosuuntaajia (Eurosolar). Vaihtosuuntaaja tarvitsee toimiakseen myös vähintään 24 V tasajännitteen, josta seuraa yleensä se, että akkuja täytyy kytkeä sarjaan ja lisätä mahdollisesti akkujen määrää akuston varauskapasiteetin kasvattamiseksi rinnankytkennässä, mikä nostaa järjestelmän kokonaishintaa. Järjestelmän suurempi kokonaisteho edellyttää myös luonnollisesti tehokkaampia aurinkopaneeleita, jotka ovat myös kalliimpia kuin tehoiltaan pienemmät paneelit. Paneelien kokonaismäärä on yleensä myös suurempi kuin pienemmissä järjestelmissä kokonaistehontarpeesta johtuen. Kuluttajalle kuitenkin vaihtosuuntaajalla toteutettava järjestelmä on paljon käytännöllisempi kodintekniikan helppokäyttöisyyden ansiosta. Lisäksi hankinta- ja asennuskustannusten jälkeen sähkönkäyttö on käytännössä ilmaista, sillä järjestelmässä oikeastaan akusto ja vaihtosuuntaaja ovat ainoita, mitkä edellyttävät säännöllistä huoltoa. Vaihtosuuntaajalla toteutettuja järjestelmiäkin käytetään ensisijaisesti vapaa-ajan asuinnoissa, joissa ei ole liityntää verkkoyhtiön sähköverkkoon. Se soveltuu kuitenkin myös hyvin esimerkiksi omakotiloasumiseen varavoimana tai kodintekniikkaa, kuten kylmälaitteita säännöllisesti osa-aikaisesti ylläpitävänä järjestelmänä.

4.2 Verkkoon kytkettävä järjestelmä

Akuton, verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä on akullista järjestelmää uudempi järjestelmätyyppi ja niiden käyttö on viime aikoina yleistynyt nopeasti. Monissa käyttökohteissa, kuten suurissa aurinkovoimaloissa ilman akustoa toteutettu järjestelmä on, ainakin vielä nykytekniikalla toteutettaessa, ainoa mahdollinen järjestelmätyyppi. Akustolla toteutettu aurinkosähköjärjestelmä ei nimitäin välttämättä pysty ottamaan kaikkea aurinkopaneeliston tuottamasta kokonaistehosta vastaan, mikä johtuu siitä, että akuston latausvirta on rajoitettu tietylle tasolle. Verkkoon kytkettävissä järjestelmissä latausvirta ei puolestaan aseta rajoituksia, vaan koko aurinkopaneelien tuottama kokonaisteho saadaan valjastettua hyötykäyttöön, mikäli järjestelmässä syntyviä häviöitä ei huomioida. Liitteessä 1 on esitetty standardinmukainen periaatekaavio verkkoon kytkettävästä aurinkosähköjärjestelmästä.

4.2.1 Järjestelmän toiminta

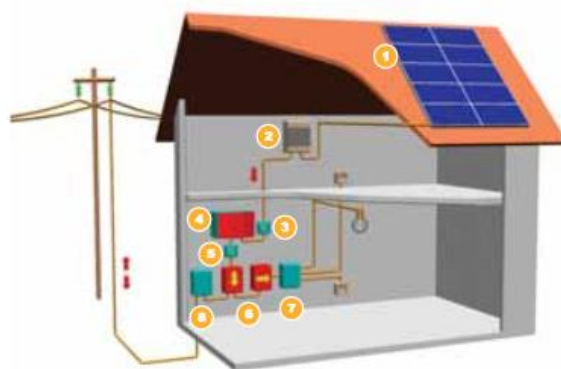
Sähköverkkoon liitetty järjestelmä (ON-Grid, Grid-connected) on järjestelmätyyppi, jossa ei ole ollenkaan akustoa ja järjestelmäkomponentteja on sen ansiosta vähemmän. Järjestelmässä aurinkopaneelilta saatava sähköenergia siirretään suoraan invertterille, joka myös tässäkin tapauksessa muuntaa paneelilta saatavan tasajännitteen yleensä 230 V vaihtojännitteeksi kodintekniikan käyt-

töön. Verkkoon kytketyssä järjestelmässä paneeleilta saatavaa sähköenergiaa ei siis varata mihinkään talteen, vaan sähköenergia hyödynnetään välittömästi. Mikäli kiinteistössä ei ole sähköntuottoaikana sähköä kuluttavia laitteita, menee tuotettu sähköenergia ”hukkaan”. Verkkoon kytkettävässä järjestelmässä sähköenergian tuhlaaminen voidaan kuitenkin estää kytkemällä järjestelmä syöttämään sähköä verkkoyhtiön verkkoon päin, jos kiinteistössä ei ole kulutuskuormaa riittävästi. Sähköyhtiön verkkosyöttöä varten täytyy kuitenkin ensin selvittää millaisen vaihtosuuntaajan verkkoyhtiö hyväksyy sekä hyvä olisi myös tietää maksaako verkkoyhtiö heidän verkkoonsa syötetystä sähköstä minkäänlaisia korvauksia. Tämä tieto on tärkeää, sillä myös verkkoyhtiön verkkoon päin syötetyn sähkön mittaamisesta voi aiheutua kuluja, jos verkkoyhtiö joutuu vaihtamaan tai ohjelmoimaan uudelleen etäluettavan mittarinsa, joka normaalisti mittaa vain verkkoyhtiön verkosta syötetyn sähkön määrää kiinteistölle. Verkkosyötöstä täytyy myös laatia sopimukset verkkoyhtiön kanssa. Järjestelmän sähköverkkoon liittämisestä löytyy lisätietoa luvussa 6.

Toimintaperiaatteeltaan verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä on pääosin samanlainen kuin akullinenkin järjestelmä. Järjestelmässä on tosin vähemmän komponentteja akuston puuttumisen takia. Tämän vuoksi siinä ei myöskään tarvita erillistä lataussäädintä. Verkkoon kytkettävän järjestelmän komponenteista löytyy lisätietoa luvusta 5. Lisäksi järjestelmän sähkökeskukseen kytkettävät vaihtosuuntaajat toimivat erilaisilla käyttöjännitteillä kuin akullisissa järjestelmissä, minkä vuoksi järjestelmässä käytettävän vaihtosuuntaajaan tulee olla juuri verkkoon kytkettävään aurinkosähköjärjestelmään soveltuva. Vaihtosuuntaajan DC- puolelle syötettävän tasajännitteen tulee lisäksi olla vähintään tuotettavan AC-huippujännitteen suuruinen, jotta järjestelmä pystyy syöttämään sähköä sähköverkkoon. Kuvassa 3 on esitetty akuttoman aurinkosähköjärjestelmän rakenne pääpiirteittäin.

Kaaviokuva omakotitaloon asennettavasta aurinkosähköjärjestelmästä ja sen osista:

- 1 Aurinkopaneelisto
- 2 Paneeliston kytkentäkotelo (sulakkeet ja estodiodit)
- 3 Tasasähkökytkin
- 4 Inverteri eli vaihtosuuntaaja
- 5 Vaihtosähkökytkin
- 6 Energialaskurit
- 7 Talon sähköpääkeskus (sulakkeineen)
- 8 Talon sähköliityntä



KUVA 3. Akuttoman aurinkosähköjärjestelmän rakenne (Naps 2013.)

4.2.2 Järjestelmän käyttösovellukset

Käytännössä verkkoon kytkettävä järjestelmä soveltuu parhaiten esimerkiksi omakotitaloon avustavaksi järjestelmäksi. Järjestelmällä on tosin mahdollista toteuttaa kokonaisteholtaan suuriakin järjestelmiä, sillä maailman suurimmat aurinkovoimalat on toteutettu verkkoon kytkettyinä järjestelminä. Suurempia järjestelmiä yksityiskäyttöön on myös periaatteessa mahdollista toteuttaa akullisina järjestelminä, mutta niiden rakentaminen on yleensä kannattavaa lähinnä kriittisissä kohteissa, joissa sähkökatkoksen aikana nopea varavoiman saanti on tärkeää. Verkkoon kytketyllä järjestelmällä voi-

daan esimerkiksi omakotaloissa syöttää jopa kaikkia kolmea pienjänniteverkon vaihetta joko kolmen 1-vaihesuuntaajan tai yhden 3-vaihesuuntaajan avulla. Järjestelmän kokonaiskustannukset vaihtelevat todella paljon etenkin järjestelmän kokonaistehosta riippuen. Yleisesti ottaen verkkoon kytkettävien aurinkosähköjärjestelmien hinnat laskevat suhteessa tehoon, mitä suurempi järjestelmä on. Yleisesti järjestelmien hinnat suhteessa tuotettuun teoreettiseen tehoon ovat nykyisin vähintään noin 2€/W (taulukko 3).

4.3 Muita aurinkosähköjärjestelmätyyppejä

Perinteisten akullisten ja akuttomien järjestelmien lisäksi on kehitteillä sekä jo nyt käytössä muitakin aurinkosähköratkaisuita, joissa sähköntuotto on toteutettu eri tavoin kuin perinteisissä ratkaisuissa. Esimerkkejä muunlaisista aurinkosähköjärjestelmistä ovat keskittävät järjestelmät CPV ja CSP, joissa molemmissa auringon valoteho keskitetään tiettyyn kohteeseen. Toistaiseksi vasta testauskäytössä olevissa CPV-järjestelmissä auringon valosäteily kohdistetaan peilien tai linssien avulla monilii-tosaurinkopaneeleille, joista on esitetty lisätietoa luvussa 5.1.3. CSP-järjestelmiä on puolestaan jo nykyään käytössä ja niissä auringon valo keskitetään peilien avulla nestettä (yleensä vettä) sisältävään lämmönjohtimeen tai säiliöön, jonka seurauksena syntyvän ylipaineisen höyryn avulla pyöritetään generaattoria sähköä tuottamiseksi. Keskittävillä järjestelmillä tuotettu sähkö voidaan käyttää paikallisesti tai syöttää esimerkiksi jakeluverkkoon. (Saarensilta 2012-12-19.)

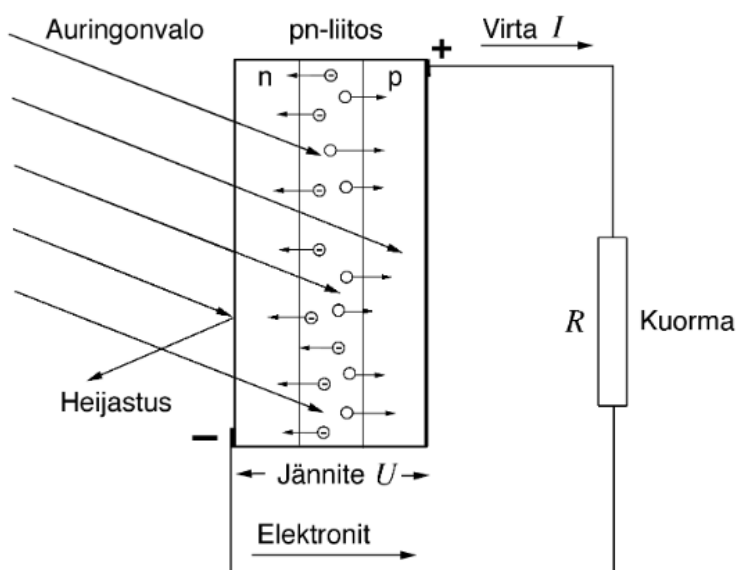
Rakennuksiin ja rakenteisiin integroitavat (BIPV) aurinkosähköjärjestelmät kasvattavat myös jatkuvasti suosiotaan maailmalla. Niissä ajatuksena on jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa korvata osa rakennuksen normaaleista rakennuselementeistä aurinkopaneeleilla. Aurinkopaneeleilla voidaan korvata esimerkiksi kattotiiliä, ulkoseinämateriaaleja, lasipintaa tai erilaisia katoksia. Tämän ansiosta muun muassa rakennuskulut pienenevät sekä aurinkopaneelit saadaan upotettua lähes huomaamattomasti rakenteisiin ilman erillisten telineiden käyttöä. BIPV-järjestelmissä käytetään paljon ohutkalvopaneeleita, joista on esitetty lisätietoa luvussa 5.1.2. BIPV-tekniikan yleistymistä lähitulevaisuudessa tulee todennäköisesti edistämään huomattavasti maalimaisten, orgaanisten materiaalien käyttöönotto. Niiden käytön ansiosta perinteisten aurinkopaneelien käyttöä voitaisiin vähentää BIPV-järjestelmissä. (Saarensilta 2012-12-19.)

5 VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

Verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä koostuu muutamasta pääkomponentista, joita ovat aurinkopaneelit, kaapelit ja vaihtosuuntaaja. Lisäksi järjestelmän asennuksessa tarvitaan muita yleisiä asennustarvikkeita, kuten jakorasioita. Liitteessä 1 on esitetty aiemmin mainittu periaatekuva järjestelmän rakenteesta. Aurinkopaneelien kiinnitykseen käytettävät telineet tulee myös valita tapauksittain. Telineiden valinnasta ja aurinkopaneelien asennuksesta on esitetty lisätietoa luvussa 7.

5.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneeli (PV modul, solar panel) on aurinkosähköjärjestelmän keskeinen komponentti, jonka avulla sähkö tuotetaan järjestelmässä. Aurinkopaneeli koostuu aurinkokennoista, joita on yhdessä paneelissa useita. Paneelin toimintaperiaate on periaatteeltaan seuraavanlainen: Fotoneista koostuva auringonsäteily vapauttaa elektroneja aurinkokennoissa, minkä jälkeen fotonien energia siirtyy positiivisille ja negatiivisille varauksenkuljettajille, jotka liikkuvat vapaasti kennoissa. Aurinkokenno koostuu kahdesta vain hiukan toisistaan atomien varausjaukamaltaan eroavasta puolijohdemateriaalista (p- ja n-materiaali). Eron seurauksena kennojen sisälle syntyy sähkökenttä, joka liikuttaa auringonvalon vapauttamia positiiviset ja negatiiviset varauksenkuljettajat erilleen kennojen sisällä. Lopuksi varauksenkuljettajat siirtyvät kennojen ulkopuoliseen piiriin, jossa paneelilta saatua sähköä voidaan hyödyntää käytännössä (TKK 2014.) Aurinkopaneelien aurinkokennojen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4 (Suntekno 2010).



KUVA 4. Aurinkopaneelin toimintaperiaate (Suntekno 2010.)

Nykyisin käytössä olevat aurinkopaneelityypit jaetaan tavallisesti kahteen erilaiseen päätyyppiin eli yleensä piistä koostuviin puolijohdepaneeleihin sekä erilaisista materiaaleista koostuviin ohutkalvopaneeleihin. Tulevaisuudessa yleistyvät todennäköisesti myös moniliitospaneelit, jotka hyödyntävät paremmin valon spektriä.







Kuluttajan kannalta oleellisin tieto aurinkopaneeleista saadaan laskemalla paneelin hinnan ja tehon (Wp) suhde (€/W). Hinnan ja tehon suhteen laskemalla on helppo vertailla paneeleita keskenään ja valita tämän perusteella halvin paneeli erilaisiin käyttötarkoituksiin. Wp on laboratorio-olosuhteissa määritelty teoreettinen nimellisteho, jonka paneeli antaa auringonvalon osuessa siihen kesällä 35° kulmassa ja auringon säteilytehon ollessa 1 000 W/m². Käytännössä Wp-tehoa on kuitenkin lähes mahdoton saavuttaa. Esimerkiksi, mikäli nimellisteholtaan 250 Wp monikidetekniikalla toteutettu aurinkopaneeli maksaa 350 euroa, saadaan hinnan ja tehon suhde seuraavasti (kaava 1) (Finnwind 2014):

$$\text{Hinnan ja tehon suhde} = \frac{350 \text{ €}}{250 \text{ W}} = 1,4 \text{ €/W} \quad (1)$$

Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien aurinkopaneelien tulisi myös olla keskenään samanlaisia, jotta niitä voidaan kytkeä sarjaan kokonaistehon maksimoimiseksi. Eritehoiset paneelit suositellaan asennus- ja käyttöohjeissa yleensä kytkettäväksi rinnan toiminnan varmistamiseksi, mikä laskee paneeleilta saatavaa tehoa. Tietenkin myös järjestelmän mitoitus- ja valintaperusteet vaikuttavat siihen, kytketäänkö aurinkopaneelit sarjaan vai rinnan järjestelmälle sopivan kokonaistehon ja virran saavuttamiseksi. Paneeleja keskenään vertailtaessa voidaan myös halutessa laskea hyötysuhde (η) paneelin nimellistehon (Wp) ja paneelin pinta-alan avulla. Hyötysuhteen laskentaperiaate on esitetty kaavassa 2 käyttämällä pinta-alaltaan 1,7 m² ja teholtaan samaista 250 Wp:n paneelia kuten edellisessäkin esimerkissä. (Finnwind 2014.)

$$\eta = \frac{250 \text{ W}}{1,7 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} * 100 \% \approx 14,7 \% \quad (2)$$

Hyötysuhteen laskeminen ei kuitenkaan ole niin oleellinen tekijä paneelien valinnassa kuin hinnan ja tehon suhde, sillä hyötysuhde jää nykytekniikoilla toteutetuilla paneeleilla joka tapauksessa melko mitättömäksi. Kuviossa 3 on esitetty esimerkkejä erilaisten aurinkopaneelityyppien hyötysuhteista sekä tarvittavasta paneelipinta-alasta 1 kWp:n tehon tuottamiseksi.

CELL MATERIAL	MODULE EFFICIENCY	SURFACE AREA NEED FOR 1 kWp
Monocrystalline silicon	13–19%	5–8 m ² 
Polycrystalline silicon	11–15%	7–9 m ² 
Micromorphous tandem cell (a-Si/μc-Si)	8–10%	10–12 m ² 
Thin film copper-indium/gallium-sulfur/diselenide (CI/GS/Se)	10–12%	8–10 m ² 
Thin-film cadmium telluride (CdTe)	9–11%	9–11 m ² 
Amorphous silicon (a-Si)	5–8%	13–20 m ² 

KUVIO 3. Hyötysuhteita erilaisilla aurinkopaneelityypeillä sekä 1 kWp:n tehon tuottamiseksi tarvittava paneelipinta-ala eri paneelityypeillä (RENI 2012.)

Aurinkosähköjärjestelmässä on yleensä useampi kuin yksi paneeli, jolloin paneeleita yhdessä kutsutaan aurinkopaneelistoksi. Aurinkosähköpuistot ovat puolestaan suuria aurinkosähkön keräyslaitoksia, joissa voi olla tuhansia aurinkopaneeleita. Yleisesti lämmitysjärjestelmien osana olevat aurinkokeräimet muistuttavat ulkonäöltään aurinkopaneeleja, mutta niitä ei tule sekoittaa keskenään, sillä niillä tuotetaan sähkön sijasta esimerkiksi kiinteistön käyttöön vain lämpöenergiaa.

5.1.1 Puolijohdepaneelit

Puolijohdepaneelit jaetaan kahteen päätyyppiin, joita ovat yksikiteisestä piistä (monocrystalline) sekä monikiteisestä piistä (polycrystalline) koostuvat paneelityypit. Paneelien ulkonäöstä huomataan yleensä helposti, kummalla tavalla paneelit on valmistettu. Yksikiteisestä piistä valmistetut paneelit ovat pinnaltaan tasaisia, yleensä mustia ja näyttävät jakautuvan selkeisiin kennoihin. Monikiteisestä piistä valmistetut paneelit puolestaan näyttävät epätasaisemmilta sekä ovat yleensä tummansinisiä sekä tarkemmin pintaa tarkastellessa huomataan paneelien koostuvan epäsymmetrisistä suikaleista.

Yksikiteisestä piistä rakennetut paneelit ovat hiukan parempia hyötysuhteeltaan kuin monikiteisestä piistä valmistetut paneelit, mutta niistäkin parhaimmillaan saatu hyötysuhde on vain 24,2 %. Normaalisti yksikitepaneelien hyötysuhteet ovat nykyisin noin 13 - 19 % paneelista riippuen. Yksikitepaneelit ovat tosin myös kalliimpia kuin monikiteisestä piistä valmistetut. Puolijohdepaneelien suuri ongelma on hyötysuhteen vaihtelu erilaisissa lämpötiloissa sekä toiminta epäsuorassa auringonvalossa (Solar facts and advice). Puolijohdepaneelien hyötysuhde esimerkiksi laskee lämpimällä säällä, mikä heikentää tehontuottoa. Tehontuotto heikkenee myös esimerkiksi, kun aurinkopaneelien suuntaus ei ole optimaalinen auringonsäteilyn kannalta tai kun sää on pilvinen.

Yksikiteisestä piistä rakennetut paneelit valmistetaan erittäin puhtaasta piikiteestä, joka ensin murenetaan kvartsiitiksi. Tämän jälkeen kvartsiittia kuumennetaan ja saadaan lopputuotteena hiilidioksidia ja sulaa piitä. Prosessin avulla saadaan täten tuotettua 99 -prosenttista piitä. Aurinkopaneelien

sä tarvitaan kuitenkin vieläkin puhtaampaa piitä, jonka valmistamiseksi kuumennus täytyy tehdä useampaan kertaan, jotta epäpuhtaudet saadaan kasaantumaan yhteen päähän piikidettä jokaisella kuumennuskerralla. Tällä tavoin epäpuhtaudet on helppo leikata jokaisen kuumennuskerran jälkeen. Perinteisesti tämän jälkeen piikidettä kasvatetaan laittamalla se sulaan monikiteiseen piihin ja lisäämällä seokseen booria prosessin tehostamiseksi. Prosessin seurauksena saadaan tuotettua lieriömäisiä, todella puhdasta piitä sisältäviä kappaleita. Seuraavassa osassa prosessia kappaleesta leikataan piikiekkoja, jotka asetellaan vierekkäin ja kuumennetaan hiukan piin sulamispisteen alapuolella olevaan lämpötilaan uunissa, jossa on piimassaan imeytyvää fosforikaasua. Valmistusprosessia valvotaan ja säädellään tarkkaan mahdollisimman yhtenäisen liitoskohdan paksuuden muodostamiseksi. (Solar facts and advice; Finwind 2014.)

Monikiteisestä piistä valmistetut paneelit ovat nykyisin yksikiteisestä piistä valmistettuja paneeleita yleisempiä, sillä niiden valmistus on halvempaa. Pienempien valmistuskustannusten ansiosta monikiteisestä piistä valmistetut paneelit ovat myös yksikidepaneeleita halvempia, mutta haittapuolena on monikiteisestä piistä valmistettujen paneelien hiukan heikompi hyötysyhyde (noin 11 - 15 %) verrattuna yksikiteisestä piistä valmistettuihin paneeleihin (Solar facts and advice). Käytön kannalta puolijohdepaneelityypillä ei kuitenkaan ole juurikaan merkitystä, sillä yksi- ja monikiteisestä piistä valmistettujen paneeleiden hyötysuhteiden ero on pieni, kuten kuviosta 3 voidaan havaita.

Monikiteisestä piistä valmistettujen paneelien valmistus eroaa yksikidepaneeleiden valmistuksesta siten, että niiden valmistuksessa sulatettu piimassa kaadetaan muottiin sen sijaan, että tehtäisiin yksi yhtenäinen sylinterin muotoinen kappale, kuten yksikiteisten paneelien valmistuksessa edellä esitettiin. Kuvassa 5 on esitetty yksikiteisestä piistä valmistetuista paneeleista koottu aurinkopaneelisto ja kuvassa 6 erilaisista monikiteisestä piistä valmistetuista paneeleista koottu paneelisto. (Solar facts and advice.)



KUVA 5. Erilaisia yksikidepaneeleita (Wikipedia 2014.)



KUVA 6. Erilaisia monikidepaneeleita (Wikipedia 2014.)

5.1.2 Ohutkalvopaneelit

Ohutkalvopaneelit (thin film) ovat puolijohdepaneelien ohella toinen merkittävä aurinkopaneelipäätyyppi. Ohutkalvopaneelit eroavat puolijohdepaneeleista siten, että niissä käytetty valmistusmateriaali on paljon ohuempaa kuin puolijohdepaneeleissa ja ne koostuvat nimensä mukaisesti erilaisista kalvoista. Ohutkalvopaneeleissa käytetyt aurinkokennot ovat paksuudeltaan vain noin 10 μm , kun taas puolijohdepaneeleissa ne ovat paksuudeltaan 100 - 300 μm . (Saarensilta 2012-12-19.) Yleisesti ohutkalvopaneeleiden etuna voidaan pitää niiden käyttökohteiden monipuolisuutta. Niitä voidaan asentaa esimerkiksi erilaisille kaareville pinnoille taivuttaen paneeli alustan pinnanmuotoiseksi. Lisäksi ohutkalvopaneelit toimivat hyvin myös epäsuorassa valaistuksessa sekä ne kestävät kuumuutta puolijohdepaneeleita paremmin. Suurena haittapuolena puolestaan voidaan pitää ohutkalvopaneeleiden huonoa hinta-tehosuhdetta, jonka vuoksi ohutkalvopaneelien tarjonta nykymarkkinoilla rajoittuukin toistaiseksi lähinnä pieniin, enimmillään muutaman kymmenen watin tehosiin aurinkopaneeleihin. Kuvassa 7 on esitetty tasakatolle asennettu ohutkalvopaneelisto.



KUVA 7. Ohutkalvopaneelisto asennettuna katolle (Wikipedia 2014.)

Ohutkalvopaneelit valmistetaan yleensä amorfiisesta piistä (a-Si), kadmium-telluurista (CdTe) tai kupari-indrium-(gallium)-diselendistä (CIS/CIGS). Metallikerroksen päällä on paneelissa läpinäkyvä johdava oksidikerros, joka voi olla esimerkiksi tinaoksidia. Oksidikerroksen ansiosta paneelin etupinnalta saadaan luotua sähköinen yhteys aurinkokennolle, sillä alla oleva metallipinta toimii toisena liitospisteinä paneelin etupinnalle. (Solar facts and advice.)

Amorfiisesta piistä valmistetut paneelit ovat ohutkalvopaneelien ensimmäinen kaupallisesti käytetty paneelityyppi. Amorfiisesta piistä valmistettuja aurinkopaneeleita alettiin aikanaan kehittää aurinkopaneelien valmistuskustannusten pienentämiseksi. Paneelien valmistuksessa aurinkokennoissa tarvittava raaka-aineiden määrä onkin vain noin 1/300 puolijohdepaneelisiin verrattuna. Yksinkertaisimmillaan amorfiisesta piistä valmistetuissa paneeleissa on vain yksi sarja p-i-n-kerroksia. (Solar facts and advice.)

Amorfiisesta piistä valmistettuja paneeleita käytetään nykyisin esimerkiksi taskulaskimissa ja muussa pienenälektronikassa, mutta niiden käyttö on yleistynyt muutoinkin paneelien hyötysuhteen parantamisessa. Hyötysuhde ei kuitenkaan vielä ole edes puolijohdepaneelien tasolla, sillä se on yleisesti vain noin 5 - 8 %, mikä rajoittaa huomattavasti paneelien käyttöä. Amorfinen pii kestää kuitenkin hyvin lämpöä ja markkinoille kehitetty hybridipaneeleita, joissa yksikiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien aurinkokennot on pinnoitettu amorfisella piillä. Tällä tavoin yksikiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien hyötysuhdetta on saatu parannettua lämpimissä olosuhteissa. (Solar facts and advice.)

Kadmium-telluurista valmistetut paneelit ovat ohutkalvopaneelien uudempaa sukupolvea. Kadmium-telluurista valmistetut ohutkalvopaneelit ovat ensimmäisiä ja toistaiseksi ainoita ohutkalvopaneeleita, joiden hinta-tehosuhde on jopa parempi kuin puolijohdepaneeleissa. Hyötysuhteeltaan kadmium-telluuripaneelit ovat parhaimmillaan hiukan yli 16 %. Haittapuolena tällä tekniikalla toteutettujen

aurinkopaneelien valmistuksessa ovat kuitenkin telluurin rajallinen saatavuus sekä huoli telluurin pitkän aikavälin terveysvaikutuksista ihmisille. (Solar facts and advice.)

CIS/CIGS- ohutkalvopaneelilla on laboratorio-olosuhteissa saavutettu jopa 20 % hyötysuhteita, joka on parempi kuin muilla ohutkalvopaneelityypeillä. Paneelien valmistus on kuitenkin niin vaikeaa, että paneelien valmistajilla on suuria vaikeuksia saada markkinoille tarpeeksi laadukkaita paneeleita kohtuulliseen hintaan. (Solar facts and advice; Monttonen 2011-3-30.)

5.1.3 Moniliitospaneelit

Nykyään on kehitteillä uutta tekniikkaa olevia keskittämissä aurinkosähköjärjestelmissä (CPV) käytettäviä moniliitosaurinkopaneeleita, jotka eroavat perinteisistä aurinkopaneelityypeistä selkeästi. Niissä käytetään erilaisia puolijohdemateriaaleja, joita on ripoteltu kalvoille yhtenäisen pinnan sijaan pisteittäen siten, että vain 0,1 % kennojen pinta-alasta on peitetty niillä, mikä säästää huomattavasti valmistuksessa tarvittavia materiaalmääriä. Kennoissa jokaisen puolijohdemateriaalia olevan pisteen päälle on asetettu peili tai linssi, joiden avulla auringonsäteet keskitetään puolijohdemateriaalista koostuviin pisteisiin. Tällä tavoin valmistetuilla aurinkopaneeleilla on jo saavutettu testeissä 42,5 % hyötysuhde, mikä on jopa yli kaksinkertainen perinteisillä tavoilla valmistettuihin aurinkopaneelisiin verrattuna. Suurena ongelmana moniliitospaneelilla toteutetuissa järjestelmissä on toistaiseksi lämpötilan nousu paneeleilla, mikä heikentää paneelien hyötysuhteita. Moniliitostekniikalla toteutetut paneelit ovat kuitenkin vielä vain testaus- ja kehitysvaiheessa eikä niiden tarkkoja hintoja normaalissa sarjatuotannossa osata toistaiseksi arvoida paneeleissa käytettävien kalliiden materiaalien takia. Tällä tekniikalla toteutetuilla aurinkopaneeleilla on kuitenkin arvioitu mahdollisesti voitavan tuottaa tulevaisuudessa halvempaa sähköä kuin hiilivoimalla toimivilla generaattoreilla. (Pihlava 2014; TUT 2014; NREL 2012.)

5.2 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja (inverter) on aurinkosähköjärjestelmän merkittävä ja yksittäisenä komponenttina järjestelmän kallein osa. Yleisesti vaihtosuuntaajaa kutsutaan invertteriksi ja sen tehtävänä on yksinkertaisesti muuttaa aurinkopaneelilta saatava tasajännite vaihtojännitteeksi (yleensä 230 V) tavallisille sähkölaitteille.

5.2.1 Vaihtosuuntaajan toiminta

Invertterien tehot vaihtelevat aurinkovoimasovelluksissa muutamasta kymmenestä watista aina jopa 100 kW:iin asti. Pienimmät invertterit toimivat 12 V DC-jännitteellä, mutta suuremmissa akullisissa aurinkosähköjärjestelmissä invertterien nimellistoimintajännite on yleensä vähintään 24 V DC. Invertterivalintaan vaikuttaa olennaisesti se, onko järjestelmä verkkoon kytkettävä vai akullinen järjestelmä, sillä niissä käytetyt nimellijännitteet ovat täysin erilaisia. Esimerkiksi 24 V tasajännite on yleisesti käytössä vain akullisissa järjestelmissä, kun taas akuttomissa järjestelmissä vaaditut nimellistasajännitteet ovat jopa useita satoja voltteja. Nimellijännitteiden suuri ero onkin merkittävä syy siihen, miksi akuttoman ja akullisen aurinkosähköjärjestelmän yhdistäminen käytännössä on hanka-

laa ja kallista. Nimellisjännite-erot johtuvat siitä, että akullisten järjestelmien invertterit ottavat hyödyntämänsä sähköenergian akustosta, joilloin nimellistasajännitteet ovat yleensä esimerkiksi 24 V, kun taas akuttomissa järjestelmissä invertterit ottavat sähköenergian suoraan paneeleilta, joiden nimellisjännite on suurempi kuin akustosta saatava jännite. Aurinkopaneelit itsessään ovat molemmissa järjestelmätyypeissä samanlaisia. (Saarensilta 2012-12-19.)

5.2.2 Vaihtosuuntaajan käyttö

Hyötysuhteeltaan sekä akullisissa että akuttomissa järjestelmissä käytettävät invertterit ovat hyviä, sillä akullisissa järjestelmissä käytettävissä inverttereissä päästään yli 90 % hyötysuhteisiin ja akuttomien järjestelmien inverttereillä jopa yli 95 %:iin. Hyötysuhteeseen vaikuttaa yleensä invertterin teho, sillä mitä tehokkaampi invertteri on, sitä parempi on yleensä sen hyötysuhde. Erillaisiin käyttö-tarkoituksiin on markkinoilla tarjolla 1-vaihe- ja 3-vaiheinverttereitä. Kolmivaiheinen aurinkisähköjärjestelmä voidaan tosin myös toteuttaa kolmella 1-vaiheinvertterillä, mutta se on kalliimpaa kuin käyttää yhtä 3-vaiheinvertteriä.

Pienissä verkkoon kytkettävissä 1-vaihejärjestelmissä invertteri kytketään yleensä siten, että sarjaan ketjuttamalla kytketyt samanlaiset tai ainakin lähes samanlaiset aurinkopaneelit kytketään kaapeleilla suoraan invertterille, mutta niissä on periaatteessa myös mahdollista kytkeä invertteri vaikka jokaisen paneelin perään erikseen. Mikäli aurinkosähköjärjestelmästä halutaan tehdä kolmivaiheinen, niin järjestelmä voidaan asentaa siten, että kaikki aurinkopaneelit kytketään sarjaan yhdelle 3-vaiheinvertterille siten, että tehdään kolme samantehoista paneeliketjua invertterin jokaista vaihetta kohden. 3-vaihejärjestelmä on tosin myös mahdollista toteuttaa niin, että muodostetaan kolme samanlaista ja samantehoista ketjua kuin 1-vaihejärjestelmässäkin, jonka jälkeen jokainen 1-vaiheinvertteri kytketään erikseen esimerkiksi omakotitalon sähkökeskukseen eri vaiheille. Invertterien käyttöikä on yleensä järjestelmätyypistä riippumatta noin 10- 15 vuotta ja niille luvataan yleensä 5 vuoden takuuta, mutta ainakin osa verkkoon kytkettävien järjestelmien invertterien valmistajista tarjoaa jopa 25 vuoden valinnaista takuuturvaa (SMA 2014).

Ulkonäöltään akullisessa ja akuttomassa järjestelmissä käytetyt invertterit poikkeavat melko selkästi toisistaan. Yleensä akullisissa järjestelmissä käytettävät invertterit ovat ulkonäöltään paljon yksinkertaisemman näköisiä kuin akuttomissa järjestelmissä käytettävät invertterit. Akullisen järjestelmän inverttereissä ei nimittäin ulospäin yleensä näy kuin laitteen toimintaa indikoivia valoja, kun taas akut-toman järjestelmän inverttereistä löytyy usein näyttöjä, joista voidaan seurata jatkuvasti esimerkiksi aurinkopaneeleilta saatavaa tehontuottoa. Joillakin verkkoon kytkettävien järjestelmien inverttereillä invertterin näytön tietoja saadaan näkymään muillakin alustoilla esimerkiksi Bluetooth-yhteyden avulla. Kuvassa 8 on eräs verkkoon kytkettäviin järjestelmiin soveltuva invertteri.



KUVA 8. Sunny Boy 2000HF-verkkoinvertteri (Lappalainen 2014.)

5.3 Verkkoon kytkettävän järjestelmän suojaus

Aurinkosähköjärjestelmää suunniteltaessa on myös oleellista miettiä järjestelmälle riittävä suojaus erilaisia ongelmatilanteita varten. Suojauksen huolellinen suunnittelu ja toteuttaminen on tärkeää hyvin toimivan ja pitkäikäisen järjestelmän toteuttamisessa. (Saarensilta 2012-12-19.)

5.3.1 Ukkossuojaus

Aurinkosähköjärjestelmissä ukkonen on yksi suurimmista riskitekijöistä, jolta järjestelmä täytyy suojata. Aurinkosähköjärjestelmässä varsinkin paneelit on asetettu yleensä sellaisiin paikkoihin, jotka ovat todella alttiita erilaisille ilmasto-olosuhteille, myös ukkoselle. Lisäksi järjestelmän pitkäikäisyys kasvattaa riskiä esimerkiksi salmaniskuille järjestelmän elinkaaren aikana. Ukkossuojauksen toteuttaminen on erittäin tärkeää, sillä aurinkosähköjärjestelmän komponentit ovat herkkiä suurille jännitepiikeille, joita esimerkiksi salamaniskut voivat aiheuttaa. Järjestelmän korjauskulut ukkosen aiheuttamien vahinkojen jäljiltä voivat olla myös suuria. Invertterit ovat järjestelmän yksittäisinä komponentteina tärkein suojattava osa hankintakustannustensa takia. Ukkonen voi tietenkin vahingoittaa myös aurinkopaneeleita sekä kaapeleita, joiden vioittuminen myös vaikuttaa oleellisesti järjestelmän toimintaan. Aurinkosähköjärjestelmissä ukkossuojaus toteutetaan siten, että järjestelmä yhdistetään rakennuksen maadoituselektrodiin, mikäli sellainen rakennuksesta löytyy. Ukkossuojausta ei kuitenkaan vaadita, mikäli rakennuksessa ei ole maadoituselektrodia. Sellaisessa tilanteessa kysees-

sä täytyy kuitenkin olla kohde, jossa ei ole verkkoyhtiön sähköverkkoliitääntä. Esimerkiksi kesämökki voi olla sellainen kohde, jossa maadoituselektrodia ei ole, jolloin käytössä oleva akullinen järjestelmä ei edellytä ukkossuojausta. (Dehn 2014; Forsström 2014.)

5.3.2 Kaapelisuojaus

Standardit asettavat aurinkosähköjärjestelmien kaapeloinnin suojaamiselle muutamia erityisvaatimuksia. Niissä on esitetty, että suojauksen tulee täyttää vaatimukset sähköiskulta suojauksen ja syötön automaattisen poiskytkennän osalta. Lisäksi järjestelmässä suositellaan käytettäväksi kaksoiseristystä tai vahvistettua eristystä ja ensisijaisesti suositellaan käytettäväksi suojausluokan II laitteita.

Suojauksen tulee täyttää myös tarvittaessa ylikuormitussuojauksen vaatimukset: *”Ylikuormitussuojaus voidaan jättää pois paneeliketjukaapeleista ja paneelistokaapeleista, jos kaapelin jatkuva kuormitettavuus joka paikassa on vähintään 1,25 kertaa $I_{SC\ STC}$ ”* tai *”Ylikuormitussuojaus voidaan jättää pois valosähköisen järjestelmän tasajännitepääkaapelista, jos kaapelin jatkuva kuormitettavuus joka paikassa on vähintään 1,25 kertaa valosähköisen generaattorin $I_{SC\ STC}$ ”*. (Valosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät SFS 6000-7-712. 2012-08-13.) $I_{SC\ STC}$ on aurinkopaneelien standardiolosuhteissa määritelty oikosulkuvirta, joka yleensä esitellään aurinkopaneelivalmistajien julkaisemissa tuote-esitteissä. Standardi määrittelee myös, että *”Valosähköisen järjestelmän syöttökaapeli on suojattava vaihtosähköpuolella oikosululta vaihtosähköjärjestelmän liitäntäpisteeseen sijoitetulla ylivilivirtasuojalla.”* (Valosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät SFS 6000-7-712. 2012-08-13.)

5.3.3 Saarekekäytön estäminen

Mikäli aurinkosähköjärjestelmä halutaan kytkeä syöttämään sähköä verkkoyhtiön verkkoon päin, on sen suojaukselle asetettu lisävaatimuksia. Saarekekäytössä tuotantoyksikkö, tässä tapauksessa verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä, jää itsekseen syöttämään koko verkkoa tai vain sen osaa ilman yhteyttä muuhun sähköjärjestelmään. Saarekekäyttötilanne aiheuttaa suuria vaaroja esimerkiksi huoltotilanteissa, jos sähköntuotanto käynnistyy jo jännitteettömäksi kytketyssä verkossa itsekseen. Vaaratilanteiden lisäksi saarekekäytöstä voi aiheutua esimerkiksi sähkölaitevaurioita, sillä järjestelmä ei välttämättä pysty toimimaan itsekseen riittävän hyvin, vaan sen itsetuottaman sähkön laatu vaihtelee liikaa standardivaatimuksiin verrattuna. (Energiateollisuus 2011-12-16.)

Saareketilanne voi syntyä, mikäli aurinkosähköjärjestelmän tuottaman tehon vaihteluväli sekä jonkin saarekkeen kuormituksen vaihteluväli ovat suuruusluokaltaan lähellä toisiaan. Yleensä saareketilanteet ovat kuitenkin epätodennäköisiä. Kyseisissä tilanteissa jännite- ja taajuussuojat tavallisesti riittävät suojaamaan saarekekäytöltä. Saarekesuojaa kuitenkin suositellaan käytettäväksi liittymispisteessä, mikäli saarekekäyttö näyttää edes hiukan mahdolliselta. Nykyisin saarekekäytön estämiseksi on yleisesti käytössä taajuuden muutosnopeuteen perustuva suojaus eli ROCOF-suojaus (rate of change of frequency, df/dt). (Energiateollisuus 2011-12-16.)

Standradi määrittelee, että järjestelmän saarekekäyttö tulee estää seuraavalla tavalla: *”Enintään 50 kVA:n suuruudessa tuotantolaitoksessa on oltava suojalaitteet, jotka kytkvät tuotantolaitoksen tai tuotantolaitoksen syöttämän saarekkeen irti yleisestä verkosta, mikäli verkkosyöttö katkeaa tai jännite tai taajuus laitteiston liitäntäkohdassa on epänormaali. Taulukossa 1 on esitelty suojauslaitteiden asetteluarvot, jossa U_n tarkoittaa jakeluverkon normaalia nimellisjännitettä.”* (Tekninen liite 1 ohjeeseen sähkötuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon-nimellisteholtaan enintään 50 kVA laitoksen liittäminen. 2013-2-28.)

TAULUKKO 1.Suojauslaitteiden asetteluarvot (Tekninen liite 1 ohjeeseen sähkötuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon-nimellisteholtaan enintään 50 kVA laitoksen liittäminen. 2013-2-28.)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0,2 s	48 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

5.3.4 Tarpeeton erottaminen sähköverkosta

Aurinkosähköjärjestelmän tarpeeton erottaminen verkosta on mahdollista etenkin viereisten lähtöjen jännitekuoppien tai vikojen aikana. Tarpeettomat erottamiset liittyvät yleensä pikajälleenkytkennän aikaiseen toimintaan tai saarekesuojauksen herkkään toimintaan, minkä takia niiltä ei voida käytännössä täysin välttyä. Mikäli tarpeeton verkosta erottumista esiintyy usein, voidaan yrittää säätää aurinkovoimalan suojausasetuksia. Suojausasetusten muuttaminen kuitenkin käytännössä heikentää sekä PJK:n että saarekesuojauksen toimintaa. Tarpeettomaan erottamiseen voi myös johtaa aurinkosähköjärjestelmän syöttämä vikavirta, kun muilla lähdöillä tapahtuvien vikojen aikana järjestelmä pyrkii syöttämään vikavirtaa kohti keskijänniteverkkoa. Vikavirran takia suuntaamaton ylivirtasuojaa voi toimia tarpeettomasti. Vikavirran aiheuttamat ongelmat kannattaa eliminoida käyttämällä suunnattua vikavirtasuojaa, jolloin edellä mainittua ongelmaa ei esiinny. Ylivirtasuojasta voimalähdössä voi myös yrittää säätää hitaammaksi kuin muilla saman aseman lähdöillä. (Energiateollisuus 2011-12-16.)

5.3.5 Vikavirtasuojauksen hidastuminen

Oikosulkusuojauksen toimintaan voi vaikuttaa se, kun aurinkosähköjärjestelmä syöttää vikaa rinnan sähköaseman kanssa. Tällöin sähköaseman syöttämä vikavirta pienenee vikavirran jakautumisen seurauksena, mikä voi hidastaa tai jopa estää kokonaan voimalähdön ylivirtasuojauksen toiminnan. Hidastumisongelman todennäköisyyteen vaikuttavat järjestelmän teho sekä etäisyys sähköasemalta: mitä tehokkaampi järjestelmä on ja mitä kauempana sähköasemasta se sijaitsee, sen todennäköisempiä ovat vikavirtasuojauksen ongelmat. Todennäköisissä ongelmatilanteissa järjestelmän nopeaa erottamista verkosta tulee korostaa. Ongelmiin voidaan myös yrittää vaikuttaa tarkastelemalla voimalähdön suojauksen toiminta-aikoja. (Energiateollisuus 2011-12-16.)

5.3.6 Vaikutus pikajälleenkytkentöihin

Pikajälleenkytkentä (PJK) voi aiheuttaa ongelmia, mikäli aurinkosähköjärjestelmä ei irtoa verkosta PJK:n jännitteettömänä aikana. Tällaisessa tilanteessa järjestelmä voi ylläpitää valokaarta vikapaisassa, mikä estää PJK:n toiminnan ja johtaa pidempiaikaiseen keskeytykseen. PJK-ongelmissa yleensä myös palaava jännite aiheuttaa järjestelmän tahdistamattoman kytkennän, joka voi vahingoittaa järjestelmän komponentteja. (Energiateollisuus 2011-12-16.)

5.3.7 Muita suojausvaatimuksia

Muita suojausvaatimuksia järjestelmille on esitetty myös erityisesti invertterien valmistajien omista ohjeista sekä pienjännitesähköasennuksia koskeissa standardeissa (Pienjännitesähköasennukset SFS 6000-4-41. 2012-08-13.) Esimerkiksi invertterin erottamiseksi tarvittavista DC- ja AC-erotuskytkimien tarpeellisuudesta voi löytyä lisätietoja valmistajien omista ohjeista. Joissakin inverttereissä esimerkiksi DC-erotuskytkin on sisäänrakennettu invertteriin, jolloin erillistä erotuskytkintä ei välttämättä tarvita. Järjestelmän suojauksessa oleellinen huomioitava asia on myös suojaaminen sähkömagneettisilta häiriöiltä. Verkkoon kytkettävässä aurinkosähköjärjestelmässä invertteri tulee pystyä erottamaan luotettavasti aurinkopaneelien ja invertterin väliltä sekä invertterin ja sähkökeskuksen väliltä (SFS 6000-7-712). (Energiateollisuus 2011-12-16.)

5.4 Verkkoon kytkettävän aurinkosähköjärjestelmän kaapelointi

Aurinkosähköjärjestelmän kokonaishyötysuhteen kannalta kaapeloinnilla ja huolellisilla liitännöillä on suuri merkitys. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että järjestelmässä käytettävien johtimien tulisi olla resistanssiltaan mahdollisimman pieniä eli niiden poikkipintojen tulisi olla tarpeeksi suuria sekä johtimien tulisi olla hyvin sähköä johtavia.

Verkkoon kytkettävässä aurinkosähköjärjestelmässä tarvitaan kaapeleita aurinkopaneelien välille sekä aurinkopaneelilta invertterille. Aurinkopaneelien välisiä kaapeleita kutsutaan paneeliketjukaapeleiksi ja paneelilta invertterille tulevaa kaapelia tasajännitepääkaapeliksi. Standardeissa ei määritellä kovinkaan tarkasti käyttöön sopivia kaapeleita. Paneeliketjukaapelien ja tasajännitepääkaapelien tulisi vain olla tasajännitteelle sopivia eli käytännössä lähes mitä tahansa AC-käyttöönkin suunniteltua kaapelia voidaan käyttää. Lisäksi tarvitaan vaihtojännitteelle sopiva kaapelointi invertteriltä kiinteistön sähkökeskukselle. Invertterin ja sähköpääkeskuksen välinen kaapeli voi olla esimerkiksi pienitehoisissa järjestelmissä normaali pienjännitesähkökaapeli, kuten MMJ.

Aurinkosähköjärjestelmässä käytettävät kaapelit tulisi mitoittaa ja valita jännitteen aleneman ja tehohäviöiden perusteella. Jännitteen alenema on sitä suurempi, mitä pidempää kaapelia käytetään. Sen seurauksena syntyy tehohäviöitä, joiden seurauksena aurinkosähköjärjestelmästä saatava kokonaisteho pienenee. Jännitteen alenemaa (U_a) ja tehohäviöitä (P_h) voidaan minimoida käyttämällä asennuksessa poikkipinnaltaan suurempia kaapeleita sekä pitämällä kaapelipituudet mahdollisimman lyhyinä. (Saarensilta 2012-12-19.)

Yleensä johtimet mitoitetaan siten, etteivät tehohäviöt ylitä 5 %:a. Suositeltavaan kuitenkin on, että häviöt olisivat vieläkin pienempiä koko järjestelmän hyötysuhteen pitämiseksi mahdollisimman optimaalisena. Tarkkoja raja-arvoja tehohäviöiden suuruudelle ei kuitenkaan ole asetettu. (Saarensilta 2012-12-19.) Kaavalla 3 voidaan esimerkiksi laskea kuparikaapelin tehohäviöt watteina sekä kaavalla 4 prosentteina (Forsström 2014). Taulukossa 2 on esitetty jännitteen alenemia (U_a) ja tehohäviötä (P_h) laskettuna erään valmistajan aurinkopaneeleilla toteutetun järjestelmän kaapeloinnissa kolmella eri kaapelipoikkipinnalla. Taulukon pohjana on 2 kWp:n verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä, jossa aurinkopaneelijännite (U) on 241,6 V, aurinkopaneelivirta (I) 8,28 A sekä kuparikaapelin ominaisresistanssi on 0,01786 Ω m.

$$P_h = I^2 * R \quad (3)$$

jossa

P_h = kaapelissa esiintyvät tehohäviöt (W)

I = aurinkopaneelivirta (A)

R = johtimen resistanssi (Ω).

$$P_h (\%) = \frac{P_h}{P_n} * 100 \% \quad (4)$$

jossa

P_h = kaapelissa esiintyvät tehohäviöt (W)

P_n = aurinkopaneelien nimellisteho yhteensä (W).

TAULUKKO 2. Kolmella erilaisella kuparikaapelin poikkipinta-alalla laskettuja jännitteen alenemia sekä tehohäviöitä 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmässä.

Poikkipinta 2,5 mm ²				
Pituus	U _a (V)	U _a (%)	P _h (W)	P _h (%)
10	0,59	0,24	4,90	0,24
20	1,18	0,49	9,80	0,49
30	1,77	0,73	14,69	0,73
40	2,37	0,98	19,59	0,98
50	2,96	1,22	24,49	1,22
60	3,55	1,47	29,39	1,47
70	4,14	1,71	34,28	1,71
80	4,73	1,96	39,18	1,96
90	5,32	2,20	44,08	2,20
100	5,92	2,45	48,98	2,45
Poikkipinta 4 mm ²				
Pituus	U _a (V)	U _a (%)	P _h (W)	P _h (%)
10	0,37	0,15	3,06	0,15
20	0,74	0,31	6,12	0,31
30	1,11	0,46	9,18	0,46
40	1,48	0,61	12,24	0,61
50	1,85	0,77	15,31	0,77
60	2,22	0,92	18,37	0,92
70	2,59	1,07	21,43	1,07
80	2,96	1,22	24,49	1,22
90	3,33	1,38	27,55	1,38
100	3,70	1,53	30,61	1,53
Poikkipinta 6 mm ²				
Pituus	U _a (V)	U _a (%)	P _h (W)	P _h (%)
10	0,25	0,10	2,04	0,10
20	0,49	0,20	4,08	0,20
30	0,74	0,31	6,12	0,31
40	0,99	0,41	8,16	0,41
50	1,23	0,51	10,20	0,51
60	1,48	0,61	12,24	0,61
70	1,73	0,71	14,29	0,71
80	1,97	0,82	16,33	0,82
90	2,22	0,92	18,37	0,92
100	2,46	1,02	20,41	1,02

6 JÄRJESTELMÄN LIITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON

Järjestelmän verkkoon liittämistä varten täytyy huomioida muutamia seikkoja sekä kuluttajan että verkonhaltijan kannalta. Tässä opinnäytetyössä suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä katsotaan sähkömarkkinalain mukaan pienimuotoiseksi tuotantolaitokseksi (alle 2 MVA:n laitos), tarkemmin määriteltynä mikrotootantolaitokseksi. Seuraavissa luvuissa on esitelty verkkoliitynnässä huomioitavia asioita.

Sähkömarkkinalaki (SmL) asettaa järjestelmän verkkoonliittämiselle seuraavia, verkkoliitännällisen järjestelmän rakentamista tukevia määräyksiä:

- *”Sähkömarkkinalain muutoksen perusteella alle 2 MVA tuotantolaitoksilta voidaan periä liittymismaksuina vain ne kustannukset, jotka aiheutuvat ainoastaan kyseistä laitosta syöttävän verkon rakentamisesta. Verkonhaltija vastaa muun verkon vahvistamisesta aiheutuvista kuluista.” (SmL 3§ ja 14b §)*
- *”Siirtomaksujen osalta on voimassa asetus, jonka mukaan jakeluverkkoon liittyvältä tuotantolta voidaan periä siirtomaksuina enintään 0,07 snt/kWh vuositasolla. Siirtomaksukatolle ei ole asetettu tehoon perustuvaa rajausta.” (SmL 14b § ja VNA sähköntuotannon siirtomaksuista sähkönjakeluverkoissa 691/2007)*

Käytännössä kaikilla on oikeus liittää tuotantolaitos verkkoon, jos se vain täyttää tuotantolaitoksen tekniset vaatimukset sähköturvallisuuden, sähkömarkkinalainsäädännön sekä niiden nojalla laadittujen standardien asettamien vaatimusten osalta. Tarkempaa tietoa sähköverkkoon liittämisestä kuluttaja voi saada esimerkiksi omalta verkkoyhtiöltään. Sähkön verkkoonsyöttö on myös sallittua keneltä tahansa, mikäli tuotantolaitoksen liityntä ja mittaus täyttävät vaatimukset sekä kun tuottajalla on ostaja (esimerkiksi verkkoyhtiö) tuottamalleen sähkölle. Ostajan löytäminen voi kuitenkin tuottaa ongelmia, sillä lainsäädäntö ei määrää ostovelvoitteita millekään markkinaosapuolelle. (Energiateollisuus 2008-11-12.)

6.1 Luvat ja asiakirjat

Aurinkosähköjärjestelmän rakentamiseen ja liittämiseen sähköverkkoon voi mahdollisesti joutua pyytämään rakennus- tai toimenpideluvan omalta kunnaltaan. Aina edellä mainitut luvat eivät kuitenkaan ole pakollisia, vaan ne ovat kunta-, asennustapa- sekä asennuspaikkakohtaisia.

Rakennus- tai toimenpideluvan lisäksi suunnitellusta aurinkosähköjärjestelmästä tulee toimittaa vaaditut asiakirjat sähkölaitokselle. Tällaisia asiakirjoja ovat esimerkiksi tekniset asiakirjat ja sähkölaitoksen omat vaatimukset sähköturvallisuuden sekä sähkömarkkinalain osalta täyttävät asiakirjat. Lisäksi verkkoonsyötöstä on sovittava verkonhaltijan kanssa. (Energiateollisuus 2008-11-12; Forsström 2014.) Tarkempia tietoja tarvittavista asiakirjoista kuluttaja saa omalta verkkoyhtiöltään.

6.2 Liittymiskustannukset

Kuten luvun 6 alussa jo sähkömarkkinalain asetuksessa (SmL 3§ ja 14b §) mainittiin, mikrotuotantolaitoksilta ei voi periä liittymismaksuina kuin laitoksen syöttävän verkon rakentamisesta aiheutuneet kustannukset. Mahdolliset verkon vahvistamisesta aiheutuneet kustannukset ovat verkonhaltijan vastuulla. Tuotantolaitoksen liittäminen seurauksena mahdollisesti aiheutuneet verkon suojausmuutokset tapahtuvat kuitenkin asiakkaan kustannuksella.

Liittymismaksuina voidaan mikrotuotantolaitoksilla periä kulutuksen ja tuoton perusteella normaalit liittymismaksut seuraavin perustein: *”Kun kohteen sähkönkulutus (verkosta otto) on samansuuruisen tai suurempi kuin tuotetun energian verkkoon anto, peritään kohteelta normaalit käyttökohteita koskevat liittymismaksut.”* tai *”Kun kohteen sähkönkulutus on pienempi kuin tuotetun energian verkkoon anto, arvioidaan pelkkää sähkönkäyttöä varten tarvittava liittymän koko ja tältä osalta peritään normaali käyttökohdetta koskeva liittymismaksu. Tämän ylittävältä osalta peritään laskennallinen tuotannon liittymismaksun periaatteita vastaava osa.”* (Pienimuotoisen tuotannon verkkoon liittäminen. 2008-11-12) Ensimmäinen peruste on kuitenkin yleisempi mikrotuotantolaitosten kohdalla. (Energiateollisuus 2008-11-12.)

6.3 Siirtomaksut

Sähkömarkkinalaki asettaa selkeät rajat siirtomaksujen suuruudelle, kuten luvun 6 alussa on esitetty (SmL 14b § ja VNA sähköntuotannon siirtomaksuista sähkönjakeluverkoissa 691/2007). Verkonhaltija voi siis periä siirtomaksuina mikrotuotantolaitokselta enimmillään 0,07 snt/kWh vuodessa. Mikrotuotantolaitoksen tuottaman sähköenergian vähäisyys voi kuitenkin aiheuttaa sen, että verkonhaltijan perimän korvauksen hinnaksi tulee suurempi summa kuin itse laskun. Siirtomaksujen perintä on kuitenkin verkkoyhtiöiden päätettävissä, minkä vuoksi kaikki verkkoyhtiöt eivät edes vaadi siirtomaksuja pientuottajilta. (Energiateollisuus 2008-11-12; Forsström 2014.)

6.4 Tariffit

Tuotantolaitoksen omistajan sekä sähköyhtiön välillä vallitsee päätös, jonka mukaisesti tuottajalle maksettava tariffi määräytyy. Tariffia ei siis ole määrättyä missään, vaikka sähkömarkkinoiden kannalta olisi edullista, että joku omistaisi verkossa olevan sähkön kaikissa tilanteissa. Sähkö, joka ei ole minkään markkinaosapuolen omistuksessa sekoittaa sähkömarkkinoita. Edellä mainittu ongelma vain korostuu, jos pientuotantolaitosten yleistymisen jatkuu. (Forsström 2014.)

Tariffien määräytymistä helpottaamaan Energiavirasto on luvannut ilmoittaa pientuotantolaitosten sähköä ostavista myyjistä Sähkönhinta.fi-palvelussa. Yhtenäinen tietopankki on myös kuluttajan etu, sillä sieltä asiakkaan on helppo tarkistaa itse markkinahinnat sekä kilpailuttaa itse verkkoon tuottamaansa ylijäämänsähkön hintaa. Monet sähkölaitokset maksavat jo nyt ylijäämänsähköstä sovittua tariffia, vaikka asiakkaan sähköntuotanto olisi vain pientä mikrotuotantoa. (Forsström 2014.)

6.5 Järjestelmän suojaus

Suojauksensa puolesta aurinkosähköjärjestelmä tulee suojata ainakin saarekekäytön, tarpeettoman erottamisen, ylivirtasuojauksen hidastumisen, PJK:n aiheuttamien vaikutusten sekä ukkosen ja maadoituksen toiminnan osalta. Luvussa 5 on esitelty tarkemmin suojauksen vaatimuksia.

6.6 Mittaus

Sähköverkkoon kytkettävä ja sähköä verkkoon syöttävä aurinkosähköjärjestelmä tulee myös varustaa kaksisuuntaisella mittarilla. Asennettavan mittarin tulee voida mitata erikseen sekä verkosta otettu että verkkoon päin syötetty sähkö. Kohteet, joissa on yli 3 x 63 A sulakkeet, tulee varustaa lisäksi erikseen tuntimittauslaitteistolla. Tuntimittauksella todennetaan kohteen oman tuotannon kulutus, johon ei huomioida tuontalolaitoksen omakäyttösähköä. Tuotannon omakäyttösähkönkulutus tulee mitata erillisellä kulutusmittauksella. (Energiateollisuus 2008-11-12.)

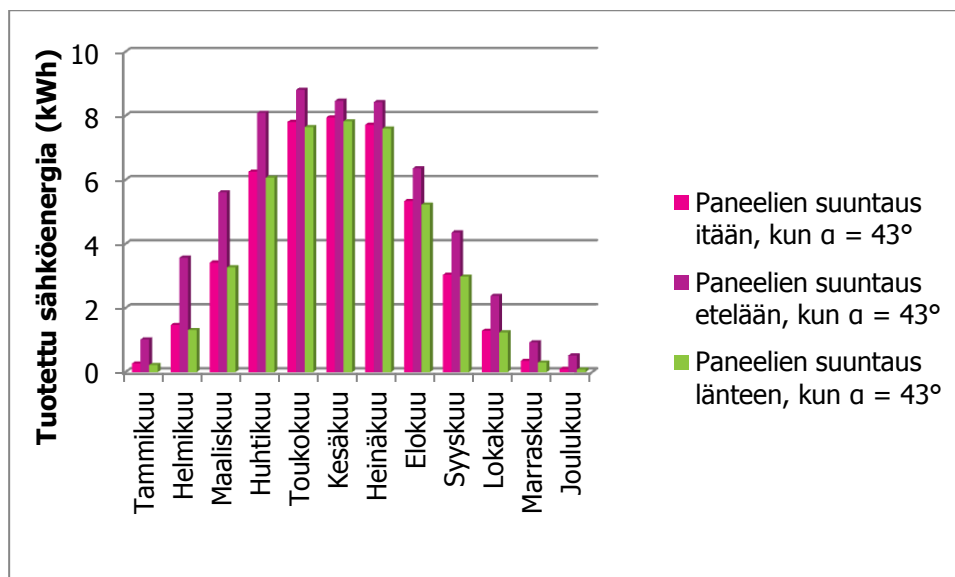
Verkonhaltija vastaa kummankinsuuntaisesta mittauksesta, mutta oman tuotannon kulutuksen mittaamisesta kuluttaja on itse vastuussa, ellei verkkonhaltija tarvitse sen mittauksesta tietoja omaan laskutukseensa. Yleensä verkkonhaltijat laskuttavat oman tuotannon kulutuksesta voimassa olevien verkkoperiaatteiden perusteella yli 1 MVA:n voimaloita. (Energiateollisuus 2008-11-12.)

Missään järjestelmissä verkosta oton ja annon netottamista mittaavaa laitetta ei saa asentaa järjestelmään. Netottava mittari vähentäisi itse verkkoon syötettävän energian määrän verkosta otetun energian määrästä. Netottavien mittareiden käyttö vääristäisi sähkömarkkinoiden toimiviuutta, sillä niiden käyttö aiheuttaisi esimerkiksi tasehallinnassa epätarkkuutta. Lisäksi verkkopalvelumaksujen määrittäminen vaikeutuisi, sillä verkkonhaltija ei pystyisi laskuttamaan verkosta otetun energian aiheuttamia verkon ylläpitokustannuksia. (Energiateollisuus 2008-11-12.)

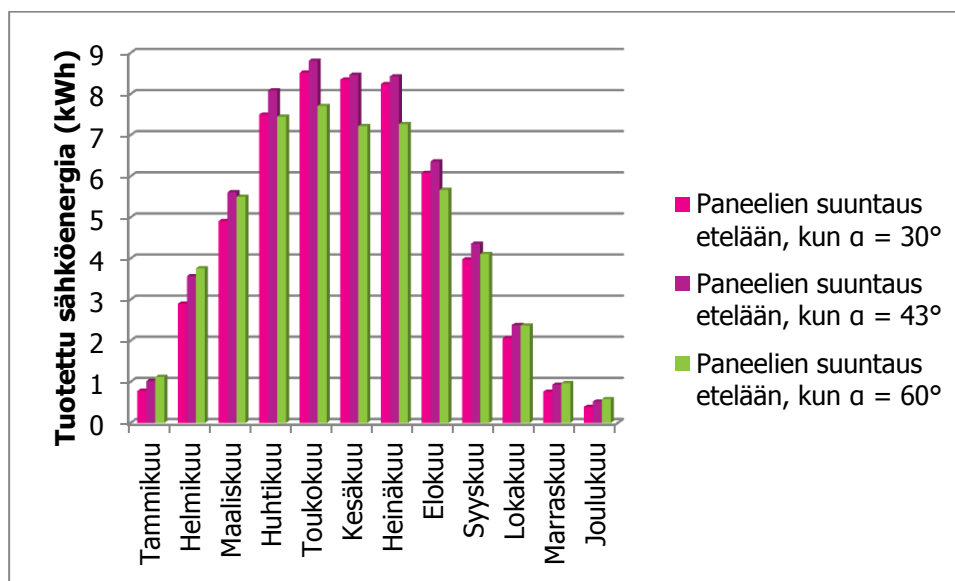
7 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN ASENNUS JA KUSTANNUKSET

Aurinkosähköjärjestelmien asennuksessa tulee pohtia muutamia olennaisia asioita. Ensimmäisenä järjestelmän asennusta suunniteltaessa tulee selvittää tarvitaanko rakentamiseen rakennus- tai toimenpidelupaa. Tämän jälkeen täytyy pohtia tilanteeseen sopivia aurinkopaneelien kiinnitystelineitä sekä asennuspaikkaa ja – tapaa. Paneelien asennuspaikan tulee olla sellainen, jossa on mahdollisimman vähän varjostavia elementtejä sähköntuotannon maksimoimiseksi. Esimerkiksi puut ovat tyypillisesti paneeleita varjostavia elementtejä, jotka laskevat järjestelmän kokonaistehontuottoa. Käytettävät telineet puolestaan voivat esimerkiksi olla suoraan omakotitalon kattoon kiinnitettäviä kiskoja, seinään, katolle tai maahan kiinnitettäviä säädettäviä telineitä tai jopa esimerkiksi maahan tai erilaisiin kiskoihin kiinnitettyjä aurinkoa seuraavia jalustoja. Pelkästään aurinkopaneelien kiinnitykseen tarvittavat telineet tai jalustat voivat muodostaa huomattavankin kuluerän järjestelmän kokonaiskustannuksissa.

Aurinkopaneelien asennuskulma sekä suuntaaminen oikein on myös todella tärkeää sähköntuotannon kannalta. Paneelien asennuskulman tulisi olla ympärivuotisessa käytössä yleisesti Suomessa noin 40- 45° maantieteellisestä sijainnista riippuen ja paneelien tulisi olla suunnattuina etelään päin sähköntuotannon optimoimiseksi. (Finnwind 2014.) Mikäli asennuskulmaa halutaan säätää vuodenaikojen mukaan, tulisi kesällä kulman olla joissain tapauksissa noin 30° ja talvella lähempänä 90°:tta maantieteellisestä sijainnista riippuen sähköntuotannon maksimoimiseksi. Talvella kuitenkin Suomen oloissa asennuskulman muuttamisella ei juuri ole käytännön merkitystä vähäisten auringon säteilymäärien takia. Käyttökohteeseen sopivimman asennuskulman arviointiin on myös olemassa erilaisia ilmaisia ohjelmia internetissä, kuten PVGIS. Esimerkiksi Kuopiossa ympärivuotisessa käytössä noin 43° on suotuisin kulma asentaa aurinkopaneelit, jonka perusteella kuviossa 4 on esitetty PVGIS -ohjelmistolla arvioituja aurinkosähköntuotantoarvoja vuorokaudessa erilaisilla paneelien suuntauksilla eri vuodenaikoina, kun asennuskulma pidetään vakiona. Kuviossa 5 on puolestaan esitetty aurinkopaneelien asennuskulman muutoksen vaikutusta sähköntuotantoon vuorokaudessa Kuopiossa PVGIS -ohjelmistolla arvioituna eri vuodenaikoina, kun aurinkopaneelien suuntaus pidetään vakiona (etelä). Kuviossa 5 huomataan, että 43° on Kuopiossa optimaalisempi kulma kuin 30° myös kesällä.



KUVIO 4. PVGIS-ohjelmalla arvioituja keskimääräisiä sähkön vuorokausituotantoja nimellistehoaltaan 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmällä Kuopiossa erilaisilla aurinkopaneelien suuntauksilla, kun paneelien suuntauskulma (α) pidetään vakiona (43°) (PVGIS 2012.)



KUVIO 5. Asennuskulman vaikutus aurinkosähköntuotantoon vuorokaudessa eri vuodenaikoina etelään suunnatulla aurinkopaneelistolla 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmässä Kuopiossa (PVGIS 2012.)

7.1 Kiinnitystelineet ja -jalustat

Erilaisia aurinkopaneelien kiinnitysmahdollisuuksia on tarjolla monelaisia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Seuraavissa kappaleissa on esiteytyt yleisimpiä aurinkopaneelien asennusratkaisuja, mutta asennusratkaisuita on olemassa paljon muitakin. Esimerkiksi taipuisien ohutkalvopaneelien asennuksessa lähes vain mielikuvitus on rajana asennuspaikkaa pohdittaessa, kunhan paneelien asennuskulma ja suuntaus on toteutettu oikein.

7.1.1 Kiinteät kattotelineet

Kiinteät kattotelineet ovat todennäköisesti yksinkertaisin ja halvin tapa toteuttaa aurinkopaneeleiden kiinnitys monenlaisissa kohteissa, kuten harjakattoisissa taloissa. Asennustapa onkin usein hyvinkin käyttökelpoinen, mikäli katon kaltevuus ja suuntaus ovat valmiiksi optimaalisia aurinkopaneeleiden toiminnan kannalta. Kiinteillä kiskoilla saadaan myös helposti toteutettua riittävän kestävä rakenne paneelien kiinnitykselle ja niihin paneelit on helppo asentaa. Mikäli kuitenkin kohteessa tarvitsee säätää paneelikulmaa tai paneelien suuntausta, ei kiinteä asennustapa ole paras mahdollinen. Kuvassa 9 on esitetty kattotelineillä toteutettu aurinkopaneeleiden kiinnitys pientalon katolla.



KUVA 9. Aurinkopaneeleiden kiinteä kattoasennus (Wikipedia 2014.)

7.1.2 Säädettävät telineet

Säädettävät telineet ovat toinen yksinkertainen tapa toteuttaa aurinkopaneeleiden kiinnitys, sillä niiden avulla paneelit voidaan kiinnittää helposti esimerkiksi tasakatolle suotuisaan kulmaan ja oikein suunnattuina. Paneelien kulmaa voidaan myös helposti säätää myöhemminkin, mutta telineiden aiheuttamien kiinnitysvaatumusten takia paneelien suuntausta voi olla hankalampi muuttaa jälkikäteen. Säädettävien telineiden suurin heikkous on etenkin pinta-alaltaan suurempien paneelien kiinnityksessä asennuksen kestävyys esimerkiksi myrskyolosuhteissa.

7.1.3 Aurinkoa seuraavat telineet

Markkinoilla on kuluttajille myös tarjolla monia erilaisia aurinkoa seuraavia teline- ja jalustaratkaisuja. Ne ovat kuitenkin normaalille kuluttajalle yleensä turhan kalliita, sillä yhden paneelin teline voi maksaa edullisimmillaankin useita satoja euroja. Aurinkoa seuraavat telineet myös kuluttavat toimissaan sähköä, mikä heikentää aurinkosähköjärjestelmästä saatua hyötyä. Lisäksi ne myös vaativat kiinnitysratkaisuiltaan enemmän kuin kiinteät kattotelineet. Niillä on kuitenkin mahdollista saada

suurta hyötyä etenkin suurissa kohteissa, joissa aurinko paistaa päivän aikana pitkään ja korkealta sekä ympäri vuoden suhteellisen tasaisesti. Esimerkiksi tuhansista aurinkopaneeleista koostuvissa aurinkosähköpuistoissa aurinkoa seuraavilla telineillä saavutetaan paljon hyötyä. Kuvassa 10 on esitetty aurinkoa seuraavien aurinkopaneelijalustojen toteutusratkaisu aurinkopuistossa.



KUVA 10. Aurinkoa seuraavia aurinkopaneelijalustoja aurinkopuistossa (Wikipedia 2014.)

7.2 Kustannukset

Verkkoon kytkettävien aurinkosähköjärjestelmien asennuksesta aiheutuu luvussa 6 esiteltujen mahdollisten sähköverkkoon liittämisen aiheuttamien kustannusten lisäksi yleensä kuluttajille komponenttien hankinta- ja asennuskustannuksia. Niiden perusteella voidaan laskea erilaisille järjestelmille niiden rakentamisen ja käytön mahdollisia takaisinmaksuaikoja. Varsinkin verkkoon kytkettävät aurinkosähköjärjestelmät ovat lähes huoltovapaita koko elinkaarensa ajan, ellei onnettomuuksia tapahdu. Invertterin vaihdosta aiheutuneet kustannukset ovat oikeastaan ainoita järjestelmän elinkaarren aikana aiheutuvia suurempia huoltokustannuksia.

7.2.1 Asennuskustannukset

Aurinkosähköjärjestelmää rakennettaessa opastettu henkilö voi joskus tehdä esimerkiksi paneelien ja telineiden kiinnityksen lisäksi myös suuren osan sähkötoista halutessaan itse ja säästää näin asennuskustannuksissa, mikäli työskennellään enintään 120 V DC-jännitteiden parissa. Yleensä kuitenkin verkkoon kytkettävien järjestelmien nimellisjännitteet ovat suurempia kuin 120 V DC, jolloin kaikissa sähkötoissa tarvitaan ammattihenkilöä (KTmp 516/96 §9 ja §10). Monet aurinkosähköjärjestelmiä myyvät yritykset tarjoavatkin avaimet käteen-periaatteella aurinkosähköjärjestelmiä, jolloin yritys huolehtii asiakkaan puolesta myös laitteiden asennuksesta alusta loppuun (Finnwind 2014). Kuluttajan voi kuitenkin joskus olla viisaampaa ostaa ja kilpailuttaa tarvittavat komponentit ja asennuspalvelut erikseen, sillä se voi olla edullisempaa.

Aurinkosähköjärjestelmän asennuskustannuksista kuluttaja voi Suomessa saada kotitalousvähennystä enintään 2 400 €. Järjestelmän kokonaishinnasta voi vähentää verotuksessa 45 % asennustyöstä. (tilanne 2014). (Helsingin Energia 2014.)

7.2.2 Järjestelmien takaisinmaksuajat

Aurinkosähköjärjestelmien takaisinmaksuaikoihin vaikuttaa moni asia, minkä takia niitä on vaikea ennakoita tulevaisuudessa. Tällä hetkellä kuitenkin todennäköisesti suurin takaisinmaksuaikoihin vaikuttava asia on sähkön hinnan vaihtelu. Myös valtiolliset ohjaukskeinot, kuten tuontanto- ja investointituet, vaikuttavat niihin. Suomessa ei kuitenkaan ole toistaiseksi juurikaan tuettu aurinkosähköntuotantoa, sillä perinteisillä tavoilla tuotetun sähkön osto on ollut halvempaa kuin tukea sähkön pientuotantoa (Paavola 2012-12-5). Lisäksi teknologian kehitys lyhentää olennaisesti tulevaisuudessa järjestelmien takaisinmaksuaikoja, kun esimerkiksi aurinkopaneelien hyötysuhteet paranevat nykyisestä tasostaan. Se johtaisi muun muassa siihen, että aurinkosähköjärjestelmissä tarvittaisiin nykyistä vähemmän paneeleita saman kokonaistehon tuottamiseksi. Takaisinmaksuaikoihin vaikuttaa myös oleellisesti se, tilataanko järjestelmä avaimet käteen-periaatteella vai asennetaanko se esimerkiksi itse. Lisäksi käytettävät aurinkopaneelien kiinnitystelineet voivat kasvattaa järjestelmän kokonaishintaa merkittävästi ja siten pidentää takaisinmaksuaikoja entisestään. Taulukossa 3 on esitetty eräiden verkkokauppojen hinnastojen perusteella suorien aurinkosähköjärjestelmien hankinta- ja asennuskustannuksia. Hintatiedoissa ei kuitenkaan ole huomioitu kiinnitystelineiden kustannuksia eikä asennuskustannusten kotitalousvähennystä.

TAULUKKO 3. Esimerkkejä eritehoisten verkkoonliitettävien aurinkosähköjärjestelmien hankintakustannuksista (Fortum 2014.)

Kokonaisteho	Järjestelmän hinta ilman asennusta (€)	Järjestelmän hinta asennettuna (€)
2 kWp	4200	5600
3 kWp	5200	6600
4 kWp	7500	8900

Tässä opinnäytetyössä suunnitellun aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuaikoja voidaan arvoida erillisissä tilanteissa esimerkiksi sähkön hinnankehityksen sekä hankinta- ja asennuskustannusten perusteella. Takaisinmaksuaikojen laskeminen perustuu kuitenkin täysin arvioihin, sillä esimerkiksi sähkön hinnan kehitystä usean kymmenen vuoden päähän on lähes mahdotonta ennustaa. Verkkoon kytkettävissä järjestelmissä verkkoyhtiön verkkoon syötetyn sähkön määrää on hankala arvioida, joten laskennoissa on oletettu, että kaikki tuotettu sähköenergia on käytetty kohteessa välittömästi. Sähkön hinnan lisäksi takaisinmaksuaikoihin vaikuttaa aurinkosähköjärjestelmän tehontuoton lasku järjestelmän ikääntyessä. Taulukossa 4 on oletettu, että 2 kWp:n verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä tuottaa sähkötehoa seuraavasti:

- vuodet 1-5 se tuottaa sähkötehoa 100 % tehokkuudella sähkön hinnan ollessa keskimäärin 16 snt/kWh

- vuodet 6-10 95 % teholla sähkön hinnan ollessa keskimäärin 17 snt/kWh
- vuodet 11-15 90 % teholla sähkön hinnan ollessa keskimäärin 18 snt/kWh
- vuodet 16-20 85 % teholla sähkön hinnan ollessa keskimäärin 19 snt/kWh
- vuodet 21-25 80 % teholla sähkön hinnan ollessa keskimäärin 20 snt/kWh
- vuodet 26-30 75 % teholla sähkön hinnan ollessa keskimäärin 21 snt/kWh

Aurinkopaneeleille luvataan yleisesti 25 vuoden käytön jälkeisen tehontuoton pysyvän vähintään 80 %:ssa alkuperäisestä arvosta (Solarwatt 2014). Paneelien tehontuoton lasku järjestelmän ikään-tyessä on suurin yksittäinen tekijä kokonaistehontuoton laskun kannalta. Invertterin käyttöäksi on arvioitu 15 vuotta ja uuden invertterin vaihdosta aiheutuneiksi kustannuksiksi 1 000 €. Invertterin vaihto on huomioitu laskelmissa, mutta kiinnitystelineistä aiheutuneita kustannuksia ei ole huomioitu lainkaan.

TAULUKKO 4. Verkkoon kytkettävän 2 kWp:n järjestelmän takaisinmaksuaika (Finnwind 2014; Santala 2011.)

Vuodet	Oletettu vuosituotto (kWh/v)	Säästetty rahasumma (€)
1-5	1700	1360
6-10	1615	1372,75
11-15	1530	1377
16-20	1445	372,75
21-25	1360	1360
26-30	1275	1338,75
	Kokonaissäästö (€)	7181,25
	Säästön keskiarvo vuosittain (€/v)	239,375
	Asennetun järjestelmän takaisinmaksuaika (v)	23,4

Taulukosta 4 voidaan havaita, että nykyisillä hankinta- ja asennuskustannuksilla sekä maltillisilla sähkön hinnankorotuksilla 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmä on maksanut itsensä takaisin vasta 24 vuoden jälkeen järjestelmän käyttöönotosta. Taulukon 4 arvioitu oletettu vuosituotto eri ajanjaksoilla perustuu Finnwindin arvioihin 2 kWp:n järjestelmien vuosittaisen tehontuoton muutoksista Suomessa järjestelmän elinkaaren aikana (Finnwind 2014). Tulevaisuudessa kuitenkin esimerkiksi mahdollisesti tapahtuvat suuret sähkön hinnankorotukset sekä komponenttien hinnanalaskut lyhentäisivät takaisinmaksuaikoja huomattavasti. Laskennassa käytetyllä maltillisella 1 sentin hinnankorotuksella kilowattitunnilta tarkasteluajanjaksojen välillä järjestelmästä saatu rahallinen säästö säilyy koko järjestelmän elinkaaren ajan melko tasaisena, mikäli invertterin vaihtoa ei huomioida, vaikka koko järjestelmän hyötysuhteen oletetaan laskevan vuosien kuluessa. Invertterin vaihto ei tosin ole välttämättä, mikäli se toimii vielä 15 vuoden käytön jälkeen moitteitta eli esimerkiksi sen takia järjestelmän toiminta ei ole merkittävästi heikentynyt. Aurinkopaneelien tehontuoton lasku on yleensä todennäköisesti suurin syy järjestelmän tehontuoton laskuun. Aurinkopaneelien tehontuoton lasku järjestelmän ikääntyessä kasvattaa väistämättä häviöitä, sillä tehontuoton laskiessa paneeleilta saata- vat jännite ja virta pienentyvät, mikä johtaa prosentuaalisten jännitteen alenemien ja tehohäviöiden kasvuun.

8 VERKKOON KYTKETTÄVÄN JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU OPETUSKÄYTTÖÖN

Sähköverkkoon liitettävän aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa pitää ottaa huomioon monia asioita, kuten jo aiemmissa luvuissa on tullut esille. Järjestelmän suunnittelu voi edetä esimerkiksi seuraavalla tavalla:

1. Päätetään kokonaisbudjetti
2. Päätetään järjestelmätyyppi sekä järjestelmän kokonaisteho
3. Otetaan selvää järjestelmää koskevista standardeista, luvista ja määräyksistä
4. Valitaan tarvittavat järjestelmäkomponentit
5. Suunnitellaan komponenttien asennuspaikat ja -tavat alustavasti
6. Suunnitellaan järjestelmän suojaus sekä mitoitetaan kaapelointi
7. Tehdään lopulliset valinnat ja päätökset
8. Järjestelmän toteutus

8.1 Järjestelmätyypin valinta

Tässä opinnäytetyössä suunniteltu 2 kW:n verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä valikoitui lopulta käytössä olleen budjetin mukaan. Lisäksi tehovalintaan vaikutti se, että 2 kW on sopiva teho 1- vaiheiselle verkkoon kytkettävälle järjestelmälle, sillä AC-puolella on käytössä 16 A sulake, jolloin yksivaiheisesti kytketyn tuotantolaitoksen näennäisteho saa olla enimmillään 3,7 kVA. Sitä suuremmat järjestelmät täytyy toteuttaa 3-vaiheisina (Paavola 2012-12-5.) Valittu invertteri pystyy oikein toimiessaan syöttämään AC-puolelle enimmillään 11,4 A:n virtaa. Teoriassa järjestelmällä saadaan tuotettua enimmillään 2 kW:n nimellistehoa, mutta käytännössä 2 kW:n tehoa ei voida aivan saavuttaa järjestelmässä syntyvistä häviöistä johtuen. DC-puolella invertterin maksimitulovirta on 12 A. Yleisesti järjestelmän tehovalintaan voi lisäksi vaikuttaa olennaisesti esimerkiksi käytössä olevat asennustilat ja -paikat aurinkopaneeleille sekä mahdolliset rakennusluvut.

8.2 Standardit, lait ja määräykset

Suunnitteluvaiheessa ST-kortistosta on apua, sillä esimerkiksi ST-kortti 55.33 käsittelee aurinkoenergiaa hyödyntäviä laitteita ja niiden liittämistä sähkönjakelujärjestelmään sekä siinä kerrotaan komponenttien toiminnasta yleisesti. Siitä löytyy lueteltuna myös yleisiä standardeja, lakeja sekä määräyksiä, jotka koskevat aurinkosähköjärjestelmiä.

ST 55.33 mainitsemia lakiasetuksia ovat:

- Sähköturvallisuuslaki (410/1996 ja muutokset)
- Sähkömarkkinalaki (386/1995 ja muutokset)

Standardeista ST 55.33 puolestaan mainitsee seuraavat standardit:

- SFS-EN 50438. Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille
- EN 60904-3. Photovoltaic devices. Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data
- EN 61215. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval
- IEC 60755. General requirements for residual current operated protective devices
- SFS 6000-5-55. Muut sähkölaitteet
- SFS 6000-7-712. Aurinkosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät
- SFS-EN 50160. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet
- SFS-EN 61439. Jakokeskukset
- SFS-EN 62446. Sähköverkkoon kytketyt valosähköiset järjestelmät. Minimivaatimukset järjestelmän dokumentaatiolla, käyttöönototestaukselle ja tarkastuksille

Asetuksista ST 55.33 mainitsee sähköturvallisuusasetuksen (498/1996 ja muutokset) ja määräysten osalta seuraavat määräykset:

- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen turvallisuudesta (1193/1999)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähköalan töistä (516/1996 ja muutokset)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä (517/1996 ja muutokset)

Lisäksi siinä luetellaan aurinkosähköjärjestelmiä koskevia muita aineistoja sekä siitä löytyy myös lomake, jolla alle 50 kVA:n mikrotuotantolaitokselle voidaan hakea verkonhaltijalta liittymislupaa sähköverkkoon (Forsström 2014). Luvussa 5.3.3 on esitetty aiemmin eräitä mikrotuotantolaitoksen verkoliitännälle asetettuja vaatimuksia.

Standardeista SFS 6000-7-712 on oleellisin standardi aurinkosähköjärjestelmiä suunniteltaessa. Se käsittelee valosähköisiä tehonsyöttöjärjestelmiä, joihin aurinkosähköjärjestelmät lukeutuvat. Luvussa 5.3.3 on esitetty kyseisen standardin vaatimuksia kaapelisuojausosalta. Standardissa esitettyjä muita suojausvaatimuksia on esimerkiksi se, että aurinkosähköjärjestelmässä invertteri tulee pystyä erottamaan sekä tasa- että vaihtosähköpuolelta huoltotöiden ja vikatilanteiden varalta. Luvussa 5.3.3 mainittu vikavirtasuojan käyttö ei siis ole välttämätöntä, mikäli invertteri voidaan erottaa luotettavasti tasa- ja vaihtosähköpuolelta, koska invertteri ei voi syöttää vikavirtaa tasasähköpuolelle. Mikäli paneeliketjukaapeleiden ja tasajännitepääkaapeleiden jatkuva kuormitus on yli 1,25 kertaa oikosulkuvirta standardiolosuhteissa eli se virta, joka syntyy aurinkopaneelien tehontuotosta, minkä ne tuottavat auringonvalon osuessa niihin kesällä 35° kulmassa ja auringon säteilytehon ollessa 1000 W/m². Tällöin ei tarvita ylikuormitussuojaa tasajännitepuolella, kuten luvussa 5.3.3 jo mainittiin. Myös yhden jännitteisen johtimen maadoittaminen tasasähköpuolelta on sallittua, mikäli invertterin erotus on toteutettu luotettavasti. (Forsström 2014.)

SFS-EN-61439-1-standardissa on puolestaan määritelty vaatimuksia sähkökeskuksille. Siinä on määritelty vaatimuksia järjestelmässä käytettäville liitännäkoteloidelle sekä jakokeskuksille. Muita suunnittelun apuna käytettäviä hyödyllisiä standardeja ovat SFS-6000-standardi pienjännitesähköasennusten osalta, joka määrittelee muun muassa invertterin kytkennässä sähkökeskukseen huomioitavia asioita, SFS-EN 50160-standardi, jossa käsitellään jakeluverkon jännitteen laatua sekä SFS-EN 62446-standardi, joka määrittelee vaatimukset esimerkiksi dokumentoinnille. (Forsström 2014)

Suunnittelussa huomioitavista lakiasioista sekä määräyksistä tärkeimmät ovat sähköturvallisuuslain 1996/410 ja sähkömarkkinalain 386/1995 sisältö sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön päätökset sähkölaitteiden turvallisuudesta (1193/1999), sähköalan töistä (516/1996) sekä sähkölaitteistojen käytöstä (517/1996). (Forsström 2014.)

8.3 Järjestelmän mitoituksen perusteet

Aurinkopaneelien tehontuottoa järjestelmässä voidaan arvoida aurinkopaneelien vuosituoton perusteella, jonka mukaan voidaan miettiä käyttötarkoitukseen kokonaisteholtaan sopivaa järjestelmää. Käytännössä aurinkosähkön vuosituoton arviointi halutussa kohteessa onnistuu todennäköisesti helpoiten käyttämällä esimerkiksi jo aiemminkin mainittua PVGIS-ohjelmistoa, jonka avulla vuosituottoa on myös helppo vertailla erilaisilla asennuskulmilla ja paneelien suuntauksilla. Esimerkiksi tässä työssä suunnitellun 2 kWp:n verkkoon kytkettävän aurinkojärjestelmän etelään päin suunnatulle aurinkopaneelistolle Kuopiossa, jossa nimellisteholtaan 250 Wp:n aurinkopaneelilla toteutetun järjestelmän aurinkopaneeliston asennuskulma on 43°, ohjelma ilmoittaa järjestelmän kokonaisvuosituotoksi 1 760 kWh. (PVGIS 2014.)

Aurinkopaneelien alustava mitoitus järjestelmässä perustuu kohteen sähkönkulutuksen arviointiin vuorokaudessa (Wh/vrk), jonka perusteella tarvittavan järjestelmän sähköntuotantoteho (W_{hp}) voidaan määrittellä. Mikäli kohteessa ei kuitenkaan ole sähköntuotannon aikaan riittävästi sähkönkulutusta, menee aurinkopaneelien avulla tuotettua sähkötehoa hukkaan verkkoon kytkettävissä järjestelmissä, ellei ylimääräistä sähköä syötetä verkkoyhtiön verkkoon päin. Käytettävän invertterin hyötysuhde sekä järjestelmässä syntyvät muut häviöt huomioidaan todellisen sähköntuotannon laskennassa.

Todellisen sähköntuotannon tulisi vastata mahdollisimman tarkasti kohteen todellista sähkönkulutusta. Oikeinmitoitettussa akuttomassa aurinkosähköjärjestelmässä nimittäin saadaan siten hyödynnettyä kaikki järjestelmän tuottama sähköteho välittömästi, jolloin sähkötehoa ei mene hukkaan ja sähkölaitteiden käytön perusteella määräytyvä sähkölasku pienenee mahdollisimman paljon.

Mikäli kohteen sähkönkulutus vuorokaudessa tiedetään, voidaan tarvittava sähköntuottovaatimus arvoida akuttomassa järjestelmässä laskemalla sähkönkulutuksen perusteella koko aurinkosähköjärjestelmän todellinen sähköntuotanto järjestelmän arvioidun kokonaishyötysuhteen avulla. Hyötysuhde voi vaihdella akuttomissa järjestelmissä esimerkiksi valituista kaapeleista ja invertteristä riippuen, mutta yleensä niissä aurinkopaneelistoa ei tarvitse ylimitoitaa järjestelmien korkean hyötysuhteen

ansiosta. Yleensä oikeinsuunnitelluissa akuttomissa järjestelmissä päästään suhteellisen helposti yli 90 %:n kokonaishyötysuhteisiin käyttämällä esimerkiksi poikki-pinta-alaltaan riittävän suuria kaapeleita sekä laadukasta invertterä.

Teoreettisen, häviöttömän aurinkopaneelien sähköntuotantotehon tulisi siis olla optimaalisessa tilanteessa suurempi kuin kohteen todellisen sähkönkulutuksen, sillä järjestelmän kokonaishäviöt laskevat aurinkopaneelien teoreettista sähköntuottoa. Akullisissa järjestelmissä hyötysuhde on puolestaan yleensä etenkin akustosta johtuen huomattavasti alhaisempi (alle 70 %), jonka vuoksi niissä aurinkopaneelista voidaan joutua ylivoimaisesti halutun sähkötehon tuottamiseksi.

Edellä esitetyn perusteella voidaan tässäkin työssä suunnitellun akuttoman aurinkosähköjärjestelmän sähköntuottoa arvioida vuorokausikohtaisesti. Esimerkiksi toukokuussa voidaan yhden vuorokauden sähköntuotoksi 2 kWp:n järjestelmässä arvioida olevan kuvion 4 perusteella noin 8 810 Wh/vrk aurinkoisen ajan ollessa vuorokaudessa noin 9 tuntia. Aurinkopaneelien asennuskulma on tässä tapauksessa 43° ja ne on suunnattu etelään. Kuvion 4 arvot on arvioitu PVGIS-ohjelmalla, ja niissä on otettu jo huomioon järjestelmässä syntyvät kokonaishäviöt.

Aurinkosähköjärjestelmän sähköntuottoa voidaan arvioida myös laskemalla. Esimerkiksi, mikäli tässä työssä valitun 2 kWp:n järjestelmän aurinkopaneelit asennettaisiin kiinteästi katolle noin 43 asteen kulmaan, voitaisiin sähköntuottoa arvioida laskennallisesti eri vuodenaikoina. Esimerkiksi vuonna 2013 toukokuun aikana auringon säteilyteho on ollut Kuopiossa Suomen sääpalvelun mukaan yhteensä noin 150 kWh/m², josta keskiarvo saadaan jakamalla edellä mainittu arvo päivien lukumäärällä (31). Auringon säteilytehon keskiarvoksi vuorokaudessa saadaan sen perusteella noin 4,8 kWh/m². Tässä työssä suunnitellun aurinkosähköjärjestelmän 250 Wp:n aurinkopaneelit ovat pinta-alaltaan noin 1,7 m²/kpl, joten yhteispinta-alaksi kahdeksalta paneelilta muodostuu noin 13,6 m². Aurinkopaneelien yhteispinta-alan sekä auringon keskimääräisen vuorokautisen säteilytehon perusteella aurinkopaneelille voidaan laskea teoreettinen auringon säteilytehon vastaanottokyky vuorokaudessa:

$$13,6 \text{ m}^2 * 4,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \approx 65,8 \text{ kWh} \quad (5)$$

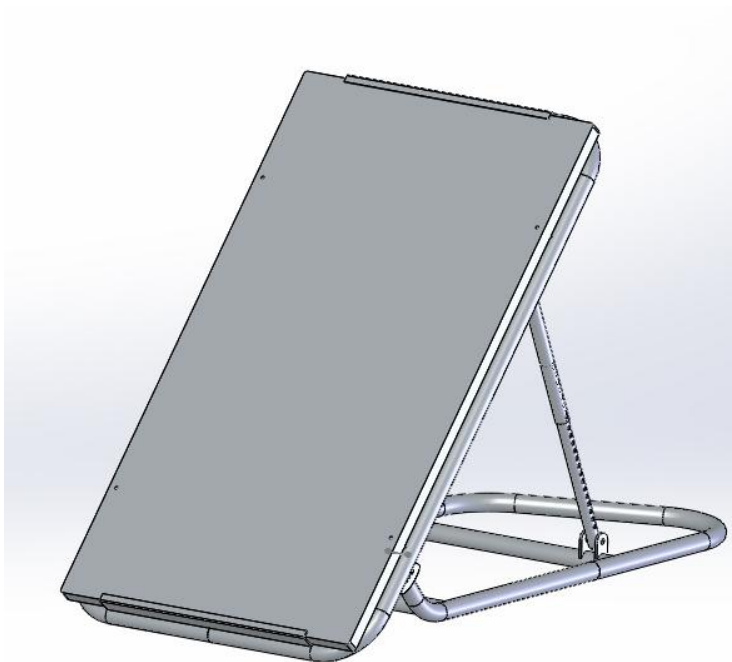
Edellä lasketun aurinkopaneelien vastaanottaman auringon säteilytehon perusteella voidaan arvioida paneelien todellista sähköntuottoa kertomalla keskimääräinen vuorokausikohtainen aurinkopaneelien vastaanottama auringon säteilyteho (65,8 kWh) paneelien hyötysuhteella (14,7 %) (kaava 2), minkä seurauksena koko järjestelmän teoreettiseksi sähköntuotantotehoksi vuorokaudessa saadaan noin 9,7 kWh. Teoreettinen sähköntuotantoteho ei kuitenkaan huomioi koko aurinkosähköjärjestelmässä syntyviä häviöitä, joten ne otetaan huomioon käyttämällä esimerkiksi kerrointa 0,9. Kokonaishäviöt huomioituna voidaan koko aurinkosähköjärjestelmän todelliseksi sähköntuotoksi vuorokaudessa siis arvioida 0,9*9,7 kWh ≈ 8,7 kWh. Tuloksesta huomataan, että se on lähes identtinen PVGIS -ohjelmistolla aiemmin arvioituun sähköntuottoon vuorokaudessa 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmässä (noin 8,8 kWh) (kuvio 4).

8.4 Järjestelmän pääkomponenttien valinta sekä asennuksen suunnittelu

Suunnittelun tässä vaiheessa valittiin alustavasti järjestelmän pääkomponentit eli aurinkopaneelit ja käytettävä invertteri ensisijaisesti hinnan perusteella. Invertterin valintaan vaikutti tosin myös olenaisesti verkkoyhtiön hyväksyntä tietyille invertterityypille myöhemmin mahdollisesti toteutettavaa verkkoyhtiön verkkoon päin tapahtuvaa sähkön verkkosyöttöä varten. Järjestelmän suojaus ja järjestelmässä esiintyvät häviöt huomioitiin ja mitoitettiin pääpiirteittäin tässä suunnitteluvaiheessa.

Taulukossa 2 on esimerkiksi esitetty oletettuja jännitteen alenemia sekä tehohäviöitä erilaisilla kaapelipoikkipinnoilla asennuskohteessa. Taulukon 2 perusteella kaapelivalinnassa päädyttiin aurinkosähköjärjestelmiin sopivan poikkipinta-alaltaan 6 mm^2 kuparikaapelin käyttöön lähes koko DC-puolella häviöiden minimoimiseksi. Ainoastaan paneeliston kytkemiseksi kytkentäkoteloon on ajateltu käytettäväksi poikkipinta-alaltaan 4 mm^2 :n aurinkosähkökaapelia (liite 2). Aurinkosähkökäyttöön tarkoitetut kaapelit eroavat tavallisista käytettävistä pienjännitekaapeleista lähinnä siten, että ne ovat yleensä yksijohtimisia. Normaalejakin vaihtojännitteille sopivia pienjännitekaapeleita pystyttäisiin kaapeloinnissa käyttämään, mutta aurinkosähköjärjestelmiä varten suunniteltujen kaapeleiden käyttö on edullisempaa sekä niiden asennus on helpompaa paremman taivuteltavuutensa ansiosta. AC-puolella käytetään tavallisia vaihtojännitekaapeleita, kuten MMJ:tä. Kaapelivalintojen puolesta järjestelmää voidaan myös laajentaa tulevaisuudessa, sillä DC-puolen kaapelointi kestää huomattavasti suuremman virran kuin mitä suunnitellussa järjestelmässä syntyy. Ainoastaan AC-puolen lyhyt kaapelointi voidaan joutua uusimaan, mikäli järjestelmän kokonaisteho tai järjestelmätyyppiä muutetaan.

Aurinkopaneelien asennusta varten kaksi Savonia-ammattikorkeakoulun konetekniikan opiskelijaa suunnitteli säädettävät asennustelineet, joilla paneelien kulmaa voidaan helposti säätää. Kulmaa voidaan säätää nostamalla tai laskemalla paneelin yläosaa telineen takaosassa olevien lukittavien liukuputkien ansiosta (kuva 11). Kulmasäätö on oleellinen ominaisuus opetusikäisessä, sillä sen avulla aurinkopaneelien asennuskulman vaikutusta voidaan helposti tutkia.



KUVA 11. Käytettävän aurinkopaneelitelineen prototyyppi.

8.5 Lopulliset valinnat ja päätökset järjestelmästä

Suunnitteluvaiheen viimeinen vaihe oli hyväksyttää suunnittelussa tehdyt valinnat ja ratkaisut eli lähinnä käytettävät aurinkopaneelit ja verkkoinvertteri. Hyväksynnän jälkeen komponentit tilattiin kohteeseen. Pääkomponenttien tilauksen jälkeen projektissa tarvittava järjestelmän asennustyö siirtyi suoritettavaksi tulevaisuudessa. Asennusajankohdan takia esimerkiksi kaapeleita ei tilattu vielä tässä vaiheessa. Lisäksi järjestelmään kytketään myöhemmin etäyhteys, jonka avulla sen toimintaa voidaan seurata myös internetistä.

8.6 Suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä

Koko suunnitteluprosessin seurauksena lopulliseksi aurinkosähköjärjestelmäksi valikoitui jo aiemmin mainittu 1-vaiheinen verkkoon kytkettävä 2 kWp:n järjestelmä, jonka komponenteista löytyy listätietoja liitteestä 2. Tarvittavan kokonaistehon tuottamiseksi valittiin kahdeksan kappaletta Solarwatt Blue 60p 250 Wp -aurinkopaneeleita, joiden nimellisjännite yhdeltä paneelilta on 30,2 V DC ja nimellisvirta 8,28 A (Solarwatt 2014). Kaikki aurinkopaneelit kytketään sarjaan yhteen ketjuun, jolloin virta ei kasva, mutta jännite nousee. Näiden tietojen perusteella paneelien teoreettinen kokonaisteho (P_p) voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

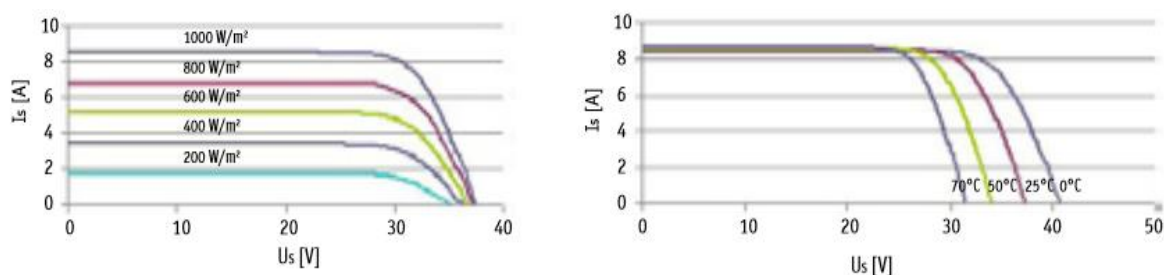
$$P_p = 250 \text{ W} * 8 = 2000 \text{ W}$$

(6)

8.6.1 Invertteri ja aurinkopaneelit

Paneelien kokonaistehon laskemisen jälkeen valittiin invertteri ja tarkistettiin, että paneeliteho ei ylitä invertterin enimmäistehoa. Tässä opinnäytetyössä invertteriksi valikoitui Sunny Boy 2000HF (SMA 2014), joka kestää 2 100 W:n paneelitehon eli edellä laskettu 2 000 W ei aiheuta ongelmia, sillä vaikka auringon valoteho olisi hetkellisesti yli standardiolosuhteissa määritellyn valotehon ($1\,000\text{ W/m}^2$), jonka mukaan aurinkopaneelien huipputeho (W_p) on määritelty, aurinkopaneelit eivät pysty tuottamaan kuin enimmillään yhteensä 40 W lisätehon ilmoitettuun nimellistehoon verrattuna paneelista riippuen. Valitun aurinkopaneelin tuote-esitteessä on nimittäin mainittu, että todellinen yhden paneelin tehontuotto voi olla enimmillään 5 W ilmoitettua nimellistehoa suurempi (Solarwatt 2014). Lisäksi yleensä auringon valotehon ollessa suurimmillaan myös ilman lämpötila on korkea, mikä heikentää aurinkopaneelien hyötysuhdetta, mikä puolestaan laskee aurinkopaneelien todellista tehontuottoa.

Aurinkopaneelien valmistajat kuvaavat yleensä paneelien tehontuottoa U/I- käyrillä, joista ilmenee minkälaisilla nimellisvirroilla ja -jännitteillä paneelit toimivat erilaisilla valotehoilla sekä miten lämpötilan muutos vaikuttaa aurinkopaneelin nimellisjännitteeseen, kun sen nimellisvirta pysyy vakiona. Kuvassa 12 on esitetty Solarwatt Blue 60p 250 Wp -aurinkopaneelin valmistajan ilmoittamat U/I- käyrät sekä valaistuksen että lämpötilan vaikutusten kannalta. Kuvaajissa I_s on aurinkopaneelin nimellisvirta, U_s nimellisjännite ja yksikkö W/m^2 tarkoittaa auringon valotehoa (Solarwatt 2014). Kuvasta 11 huomataan, että periaateessa aurinkopaneelin nimellisjännite voi olla joissakin lämpötiloissa jopa huomattavasti suurempi kuin tuote-esitteessä on ilmoitettu (30,2 V), mutta käytännössä on lähes mahdotonta, sillä esimerkiksi auringon valotehon ollessa $1\,000\text{ W/m}^2$ ilman lämpötila ei voi normaaleissa olosuhteissa olla $0\text{ }^\circ\text{C}$. Ilman lämpötila on nimittäin erittäin todennäköisesti huomattavasti korkeampi, kun auringon valoteho on standardiolosuhteissa määritelty $1\,000\text{ W/m}^2$, joka on määritelty kesäolosuhteissa. Ilman lämpötilan lisäksi aurinkopaneelin todelliseen toimintalämpötilaan vaikuttaa itse paneelin lämpeneminen auringonpaisteessa.



KUVA 12. Solarwatt Blue 60p 250 Wp-aurinkopaneelin U/I-käyrät (Solarwatt 2014.)

Seuraava vaihe oli tarkistaa paneeliketjun kokonaisjännite, sillä se ei saanut nousta yli $1\,000\text{ V DC}$:n. Lisäksi invertteri asetti vaatimuksen, että paneelilta saadun tasajännitteen tulee olla mielellään $175 - 560\text{ V}$ ja se saa olla enimmillään 700 V . (Solarwatt 2014.) Aurinkopaneelien kokonaisjännite (U_p) voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$U_p = 30,2\text{ V} * 8 = 241,6\text{ V} \quad (7)$$

Seuraava vaihe oli tarkastaa, ettei aurinkopaneeliston nimellisvirta (8,28 A) ylitä invertterin vaatimuksia. Sitä tarkastellessa huomataan, että Sunny Boy 2000HF kestää 12 A:n DC-virran eli sen osalta järjestelmä on kunnossa.

8.6.2 Kaapelointi ja järjestelmän suojaus

Kaapeloinnissa järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmiin suunniteltuja poikkipinta-alaltaan 4 mm² kaapeleita aurinkopaneelien ja kaikkien aurinkopaneelien yhteisen kytkentäkotelon välillä. Tasajännitepääkaapeleina voidaan puolestaan käyttää esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmiin suunniteltua, poikkipinta-alaltaan 6 mm² tasajännitteelle sopivaa kuparikaapelia tehohäviöiden minimoimiseksi. Tasajännitepääkaapelinakin kannattaa käyttää aurinkosähköjärjestelmiä varten suunniteltuja kaapelityyppejä. Lyhyemmillä matkoilla myös 4 mm² kuparikaapeli olisi riittävä, mutta poikkipinnaltaan 4 mm² kuparikaapeleita on markkinoilla tarjolla vähemmän kuin 6 mm² kaapeleita. Vaihtojännitepuolella invertteriltä sähkökeskukselle kaapelina voidaan käyttää esimerkiksi 3 x 2,5 S MMJ:tä. Kaapeloinnissa syntyviä häviöarvioita on esitetty liitteessä 2.

Invertterin erottamiseksi sekä tasa- että vaihtojännitepuolelle asennetaan erotuskytkimet esimerkiksi invertterin huoltoa varten.

Tasajännitepuolelle on suunniteltu lisättäväksi ylivirtasuojaa suojaamaan etenkin invertteriä. Ylivirtasuojana aurinkopaneelien ja tasajännitepääkaapelin välillä voidaan tässä tapauksessa käyttää laskennan perusteella 10 A gG-sulaketta (kaava 8), jolloin kaapelin kuormituksen on oltava vähintään 13,5 A sulakkeen toimimiseksi. Kaapelin kuormitettavuuskaan ei aseta esteitä sen käytölle. Valittujen kaapeleiden kuormituksen perusteella erillistä ylivirtasuojaa ei edes tarvittaisi standardin (SFS 6000-7-712) vaatimusten perusteella, sillä järjestelmässä käytettävien DC-kaapeleiden virrankestoisuus on joka paikassa yli 1,25 kertaa paneelien oikosulkuvirta (8,69 A) (Solarwatt 2014.) Ylivirtasuojaa asennetaan aurinkopaneelien yhteiseen kytkentäkoteloon. Myös invertteri kestää 12 A:n virran DC-puolella, joten senkin kannalta valinta on sopiva.

$$I_N \leq 0,76 * I_Z \Rightarrow I_N \leq 0,76 * 8,28 A \Rightarrow I_N \leq 6,3 A \quad (8)$$

jossa

I_N = suojalaitteen nimellisvirta (A)

I_Z = johtimen jatkuva kuormitettavuus (A).

Vaihtojännitepuolella käytetään tässä tapauksessa 16 A sulaketta ylivirtasuojana invertterin ja jakokeskuksen välillä, sillä invertterin AC-puolelle syöttämä virta voi olla enimmillään 11,4 A sekä järjestelmän näennäisteho (alle 3,7 kVA) on sopiva 16 A sulakkeen käytölle. Liitteessä 3 on esitetty järjestelmän toteutusratkaisuiden periaatekuva sekä liitteessä 4 periaattellinen mittakuva paneelistosta.

8.6.3 Asennustarvikkeet ja etäyhteys

Asennustarvikkeidensa osalta suunnitellussa aurinkosähköjärjestelmässä tarvitaan muun muassa kaapeleiden ja erotuskytkmien lisäksi esimerkiksi jakorasioita sekä erilaisia liittimiä. Lopullisesti kuitenkin muun muassa tarvittavien liittimien ja jakorasioiden tarpeesta päätetään asennuksen yhteydessä ja niiden valinnat tehdään asennustarpeiden mukaisesti.

Etäyhteys tässä opinnäytetyössä suunnitellussa järjestelmässä saadaan luotua helpoimmin invertteristä löytyvän Bluetooth-yhteyden avulla. Sen avulla esimerkiksi järjestelmän tehontuottoa voidaan seurata ja tallentaa tietokoneelle, jossa on Bluetooth-valmius. Tähän työhön valitun invertterin valmistajalla on ilmainen ohjelmisto, jonka avulla invertterin tietoja voidaan seurata tietokoneella.

9 VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN TESTAUS

Tässä opinnäytetyössä suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä on siis tarkoitus ottaa lähinnä opetus- käyttöön Savonia-ammattikorkeakoululle, kuten jo aiemminkin mainittiin. Järjestelmän toiminnan tutkimisesta onkin tarkoitus tehdä tulevaisuudessa laboratoriotyö opiskelijoille. Sen toiminnan tutkiminen onkin tulevaisuutta ajatellen erittäin hyödyllistä, sillä erilaisten aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen tulee jatkumaan lähitulevaisuudessa todennäköisesti huomattavasti. Järjestelmän rakenteeseen ja käyttöönottoimenpiteisiin päästään myös tutustumaan laboratoriotyön yhteydessä monipuolisesti testaamisen ohella.

9.1 Testaus

Järjestelmästä on mahdollista testata suhteellisen helposti muutamia olennaisia asioita. Ensisijaisena testauskohteena on järjestelmän tehontuoton muuttuminen erilaisilla asennuskulmilla sekä sen vaihtelu eri vuodenaikoina. Aurinkopaneelien suuntauksen vaikutuksenkin tutkiminen olisi hyödyllistä, mutta sen toteuttaminen ei onnistu valittujen kiinnitystelineiden takia. Suuntauksen tutkiminen nimittäin edellyttäisi käytännössä aurinkoa seuraavien telineiden käyttöä, mutta niiden aiheuttamat hankintakustannukset nostaisivat paneelitelien hintaa huomattavasti. Lisäksi seuraavien telineiden käytöllä ei välttämättä saavutettaisi suurta hyötyä Suomen olosuhteissa valoisan ajan ajoittuessa vain muutaman kuukauden ajaksi vuodessa loppukevään ja alkusyksyn välille. Toinen suuri ongelma, joka voisi syntyä aurinkoa seuraavien telineiden käytöstä on se, ettei niiden toimintaa talviolosuhteissa voida tarkasti ennakoita. Myös valitun järjestelmän suhteellisen pieni optimaalinen tuontantoteho aiheuttaa sen, ettei siinä kannata käyttää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta kuluttavia telineitä sekä mahdollisesti tarvittavia lämmitys- ja sulatusjärjestelmiä.

Järjestelmästä voidaan tutkia myös aurinkopaneelien toimintaa erilaisissa valaistusolosuhteissa, kuten pilvisellä ja aurinkoisella säällä syntyviä sähköntuotantoeroja tai miten epäsuora auringonvalo ja varjostukset vaikuttavat järjestelmän tehontuottoon. Järjestelmän virtaa ja jännitettä aurinkopaneelilta voitaisiin myös tutkia. Myös invertterin käyttöön ja toimintoihin perehtyminen käytännössä olisi opetuskäytössä hyödyllistä, sillä tässäkin järjestelmässä käytetty verkkoinvertteri on yksi yleisimpiä käytössä olevia invertterimerkkejä Suomessa. Monet verkkoyhtiöt nimittäin suosittelevat sen käyttöä, mikä näkyy myös siinä, että monet aurinkosähköjärjestelmiä kauppaavista yrityksistä käyttävät niitä myymissään verkkoon kytkettävissä aurinkosähköjärjestelmissä. Invertterityyppi on käytössä myös muissa maissa etenkin Euroopassa. Mahdollinen etäyhteyden liittäminen järjestelmään mahdollistaisi julkisen toiminnan seurannan ja sen toteuttamiseksi löytyisikin rakennuksen katolta aurinkopaneelien asennuspaikan läheltä valmis, käytössä oleva sääasema, jonka ilmottamien säätiötojen perusteella esimerkiksi paneelien toimintaa voitaisiin monipuolisesti analysoida ympäri vuoden.

9.2 Testaukseen liittyvät standardit

Aurinkopaneelien testaukseen on myös olemassa muutamia IEC-standardeja, joiden avulla paneelien toimintaa voidaan arvioida tässä opinnäytetyössä suunnitellulla järjestelmällä. Tällaisia keskeisiä IEC-standardeja ovat IEC 60904, IEC 61853 sekä IEC 62108, jotka liittyvät PV-laitteiden mittauksiin ja vaatimuksiin, suunnittelukriteereihin ja tyyppihyväksyntään sekä kennon suorituskyttestaukseen. (Saarensilta 2012-12-19.) Opetuskäytössä edellä mainituista IEC-standardeista ei kuitenkaan juurikaan ole hyötyä.

10 YHTEENVETO

Aurinkosähköjärjestelmiä kehitetään jatkuvasti, ja ne kehittyvät todella nopeasti. Tutkimus- ja kehitystyötä tehdään ympäri maailmaa ja sitä myös tuetaan taloudellisesti joillakin alueilla huomattavasti. Myös valmistajien kokonaismäärän jatkuva kasvu kiihdyttää järjestelmien kehitystä sekä järjestelmien hintojen laskua kilpailun kiristyessä. Suomessa aurinkosähköjärjestelmien rakentamisen taloudellinen tukeminen kasvattaisi todennäköisesti vuotuisia asennusmääriä huomattavasti. Kiinnostus erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä kohtaan on lisääntynyt jatkuvasti sekä yksityisten kuluttajien että yritysten osalta.

Aurinkosähköenergian tuotanto mahdollistaa helpon ja ympäristöystävällisen sähköntuotannon monissa erilaisissa paikoissa ja olosuhteissa, mikä vähentäisi riippuvuutta uusiutumattomista luonnonvaroista sekä pienentäisi siten sähköenergiantuotannosta syntyviä saastemääriä. Esimerkiksi köyhyydestä kärsivät Afrikan maat saisivat aurinkosähköjärjestelmillä tuotettua helposti sähköä omaan tarpeeseensa eivätkä olisi niin riippuvaisia muista maista tuodusta energiasta. Monessa teollisuusmaassa puolestaan varsinkin BIPV-järjestelmien käytöllä saataisiin suurta hyötyä etenkin järjestelmien kehittyessä nykyisestä tasostaan. BIPV-järjestelmien käyttö varsinkin tiheään asutuissa, pinta-alaltaan pienissä maissa Euroopassa ja Aasiassa olisi todella hyödyllistä, sillä suurien maa-alueiden valjastaminen aurinkosähköntuotantoon on niissä usein lähes mahdotonta.

Opetuskäytössä aurinkosähköjärjestelmien toiminnan tutkiminen on hyödyllistä, sillä sen avulla järjestelmien toiminta hahmottuu hyvin ja järjestelmän toiminnan seuranta ja tutkiminen on suhteellisen helppoa. Monissa oppilaitoksissa ympäri Suomea on jo rakennettu aiemmin erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä opetuskäyttöön, joten niitä hyödynnetään jo nyt opetusikäisessä eri tavoin. Tulevaisuuden sähköntuotannonkin kannalta aurinkosähköjärjestelmien hyödyntäminen ja tutkiminen on tarpeellista.

Tulevaisuudessa nähdään, miten paljon aurinkoenergian hyödyntäminen lisääntyy. Varsinkin aurinkopaneeliteknologian kehittyminen tulee todennäköisesti olemaan ratkaisevaa aurinkoenergiantuotannon yleistymisessä, sillä toistaiseksi CSP-järjestelmiä lukuun ottamatta aurinkosähköjärjestelmissä sähkö tuotetaan erilaisilla aurinkopaneeliratkaisuilla. Tietenkin myös orgaanisten materiaaleiden käyttöönotto edesauttaisi etenkin BIPV-järjestelmien yleistymistä.

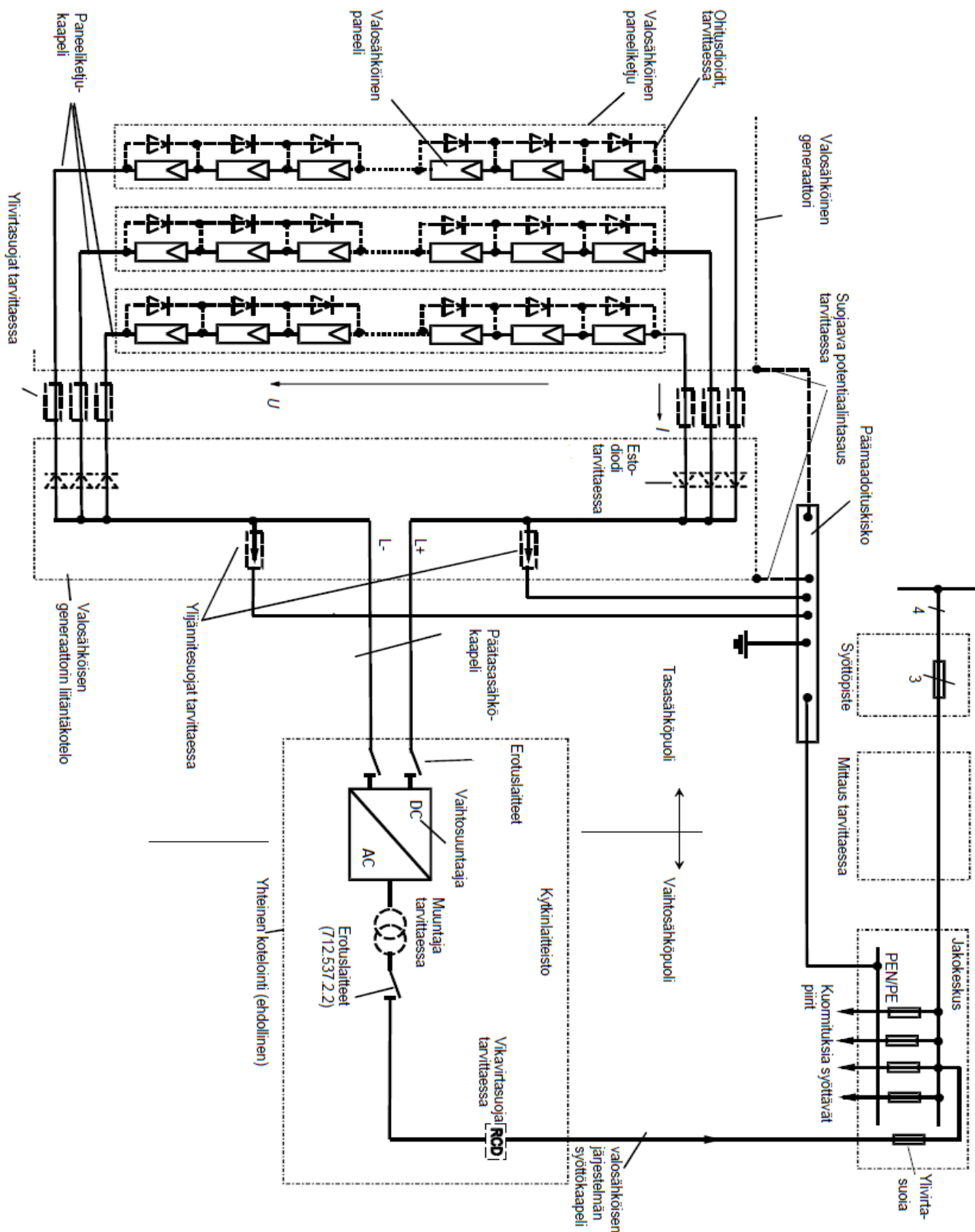
LÄHTEET

- AARNIO, Pertti 2014. New & renewable energy systems [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-1.] Helsingin teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>
- DEHN INTERNATIONAL 2014. Lightning and surge protection for photovoltaic (PV) [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-25.] Saatavissa: <http://www.dehn-international.com/sites/default/files/uploads/dehn/pdf/lpg-chapters/chapter9-18.pdf>
- ENERGIATEOLLISUUS 2011. Sähkömarkkinavisio 2030 esittely [PowerPoint-esitys]. [Viitattu 2014-3-15.] Saatavissa: <http://energia.fi/kalvosarjat/sahkomarkkinavisio-2030-esittelykalvot-pitka-sarja>
- ENERGIATEOLLISUUS 2011-12-16. Ohje verkon suunnittelun tueksi [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-20.] Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/ohje_verkon_suunnittelun_tueksi.pdf
- ENERGIATEOLLISUUS 2008-11-12. Pienimuotoisen tuotannon verkkoon liittäminen [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-26.] Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/Pienimuotoisen_tuotannon_verkkoon_liitt%C3%A4minen_muistio_20081112.pdf
- EUROSOLAR. Victron Energy [tuote-esite]. [Viitattu 2014-4-21.] Saatavissa: <http://www.eurosolar.fi/victron-energy/>
- FINNWIND 2014 a, Usein kysyttyä aurinkosähköstä [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-2-26.] Saatavissa: <http://www.finnwind.fi/aurinkovoima>
- FINNWIND 2014 b. Aurinkoenergiaopas [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-2-28.] Saatavissa: <http://finnwind.fi/aurinko/Aurinkoenergiaopas-Finnwind.pdf>
- FINNWIND 2014 c. Aurinkopaneelien asennus [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-1.] Saatavissa: <http://www.finnwind.fi/aurinkopaneelien-asennus>
- FINNWIND 2014 d. Aurinko E [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-5.] Saatavissa: <http://www.finnwind.fi/aurinkosahko>
- FORSSTRÖM, Heidi 2014. Aurinkosähköjärjestelmät ja aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu. Vaasan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/71146/forsstrom_heidi.pdf?sequence=1
- FORTUM 2013-8-13. Fortum aurinkopaketin hinnasto. [Viitattu 2014-3-6.] Saatavissa: <http://www.fortum.com/countries/fi/yksityisasiakkaat/energiansaasto/aurinkopaneeli/hinta/pages/default.aspx>
- HELSINGIN ENERGIA 2014. Aurinkosähkön pientuotanto [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-10.] Saatavissa: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Palvelumme/Tuota-sahkoa/Aurinkosahkon-pientuotanto/#24fcc9b0-f824-4744-9082-cbb519e1a834-question6>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2013. Final trends v1.02 [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-3-15.] Saatavissa: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92#c145>
- ILMATIETEENLAITOS a. Auringon rakenne ja elinkaari. [Viitattu 2014-02-27.] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakenne-ja-elinkaari>
- ILMATIETEENLAITOS b. Auringon säteily ja kirkkausvaihtelut. [Viitattu 2014-02-27.] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut>

- KAUPPA- JA TEOLLISUUSMINISTERIÖN PÄÄTÖS SÄHKÖALAN TÖISTÄ. KTmp 516/96. Finlex. Lain-
sääntö. [Viitattu 2014-3-19]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960516>
- MONTONEN, Juho 2011. Aurinkosähkötekniikan tilannekatsaus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
Sähkötekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö. Saatavissa:
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69953/nbnfi-fe201107261930.pdf?sequence=3>
- NAPS. [kuva]. [Viitattu 2014-5-7]. Saatavissa:
http://www.napssystem.com/wordpress/wp-content/uploads/2013/10/Naps_cottage12_FI_mail.pdf
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY 2012. Opportunities and challenges for development
of a mature concentrating photovoltaic power industry [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2014-3-25.] Saa-
tavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/43208.pdf>
- PAAVOLA, Minna 2012. Verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella.
Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Saatavissa:
http://www.tampere.fi/material/attachments/v/6HSsw1Wei/Diplomityo_Paavola_painettuversio.pdf
- PIHLAVA, M. Aurinkopaneelien teho kaksinkertaiseksi – uusi tekniikka säästää materiaalissakin. Tek-
niikka&talous [verkkouutinen]. [Viitattu 2014-2-27.] Saatavissa:
<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/aurinkopaneelien+teho+kaksinkertaiseksi+ndash+uusi+tekniikka+saastaa+materiaalissakin/a969540>
- PVGIS. [kuva]. [Viitattu 2014-4-2]. Saatavissa:
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmeps/eu_cmsaf_opt/PVGIS_EU_201204_publication.png
- RUUKKI 2011-3-4. INLINE: Aurinkosähköä vaivattomasti ja edustavasti. Ruukki [verkkouutinen].
[Viitattu 2014-3-25.] Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Uutisarkisto/2011/Inline-Aurinkosahkoa-vaivattomasti-ja-edustavasti>
- RENI. Inverter and PV system technology [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2014-4-1]. Saatavissa:
http://www.pv-system-tech.com/fileadmin/user_upload/material2012/InSyst2012_Screen.pdf
- SAARENSILTA, Jukka 2012. Aurinkosähkön hyödyntäminen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talo-
tekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö. Saatavissa:
<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53374/Aurinkos.pdf?sequence=1>
- SANTALA, Sanna 2011. Oma energiantuotanto ja sen kytkeminen kiinteistöjen sähköverkkoihin.
Tampereen Ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30981/Santala_Sanna.pdf?sequence=2
- SMA. Technical Data SUNNY BOY 2000HF [tuote-esite]. [Viitattu 2014-4-7.] Saatavissa:
<http://www.sma.de/en/products/solar-inverters-with-transformer/sunny-boy-2000hf-2500hf-3000hf.html#Technical-Data-8703>
- SOLAR FACTS AND ADVICE. 8 good reasons why monocrystalline solar panels are the industry
standard [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2014-3-5.] Saatavissa:
<http://www.solar-facts-and-advice.com/monocrystalline.html>
- SOLAR FACTS AND ADVICE. Why are polycrystalline solar cells so popular? [verkkójulkaisu]. [Viitattu
2014-3-6.] Saatavissa: <http://www.solar-facts-and-advice.com/polycrystalline.html>
- SOLAR FACTS AND ADVICE. Which thin film solar technology is the best? [verkkójulkaisu]. [Viitattu
2014-3-7.] Saatavissa: <http://www.solar-facts-and-advice.com/thin-film.html>
- SOLARWATT. Solarwatt Blue 60P Technical Data [tuote-esite]. [Viitattu 2014-4-9.] Saatavissa:
https://www.solarwatt.de/fileadmin/user_upload/pdf/datenblaetter/datenblaetter_englisch/SOLARWATT_BLUE_60P_eng_web.pdf

- ST 55.33. Aurinkoenergiaa hyödyntävät laitteet ja niiden liittäminen rakennuksen sähkönjakelujärjestelmään [ST-kortisto]. [Viitattu 2014-22-4]. Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>
- SUNTEKNO 2010. Aurinkopaneelin toimintaperiaate [kuva]. [Viitattu 2014-04-26.] Saatavissa: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf>
- SUNTEKNO 2012. Aurinkopaneelin asennusohje [kuva]. [Viitattu 2014-04-29.] Saatavissa: <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//Aurinkopaneelin%20asennusohje.pdf>
- SUOMEN SÄÄPALVELU. Auringon säteilyteho Kuopiossa [kuvio]. [viitattu 2014-03-30]. [Viitattu 2014-3-28.] Saatavissa: <http://www.saapalvelu.fi/kuopio/kayrat.php>
- TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO. Moniliitoskennot [luentomateriaali]. [Viitattu 2014-3-13.] Saatavissa: <http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-53010/luennot2013/moniliitoskennot.pdf>
- THE INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY 2012. Concentrating solar power [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2014-3-30.] Saatavissa: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf
- WIKIPEDIA a. [kuva]. [Viitattu 2014-03-31.] Saatavissa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Solar_panels_in_Ogiinuur.jpg
- WIKIPEDIA b. [kuva]. [Viitattu 2014-03-31.] Saatavissa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Mafate_Marla_solar_panel_dsc00633.jpg
- WIKIPEDIA c. [kuva]. [Viitattu 2014-3-31.] Saatavissa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/65/Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Ken_Fields_1.JPG/800px-Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Ken_Fields_1.JPG
- WIKIPEDIA d. [kuva]. [Viitattu 2014-3-31.] Saatavissa: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/SolarFachwerkhaus.jpg>
- WIKIPEDIA e. [kuva]. [Viitattu 2014-3-31.] Saatavissa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Nellis_AFB_Solar_panels.jpg

LIITE 1: VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN PERIAATEKAAVIO



KUVIO 6. Verkkoon kytkettävän aurinkosähköjärjestelmän periaatekaavio
(Valosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät SFS 6000-7-712, 2.painos, 2012-8-13.)

LIITE 2: 2 KWP VERKKOON KYTKETTÄVÄN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT JA KAAPELOINNIN ESIINTYVIEN HÄVIÖIDEN ARVIO

Aurinkopaneeli

Max. system voltage
Nominal power
Nominal voltage
Nominal current

Solarwatt Blue 60p 250 Wp

1000 V
250 Wp
30,2 V
8,28 A

Inverteri

Sunny Boy 2000HF

Input (DC)

Max. DC power
Max. Input voltage
MPP voltage range/rated input voltage
Max. Input current/per string

2100 W
700 V
175 V-560 V/ 530 V
12 A

Output (AC)

Rated power (230 V,50 Hz)
Max. Apparent AC power
Nominal AC voltage/range
AC power frequency/range
Rated power frequency/rated grid voltage
Max. output current

2000 W
2000 VA
220 V, 240 V/180-280 V
50 Hz, 60 Hz/-4,5 Hz...+4,5 Hz
50 Hz/ 230 V
11,4 A

Kaapelointi

Aurinkopaneeleilta kytkentäkotelolle
Kytchentäkotelolta inverterille
Inverteriltä sähkökeskukselle

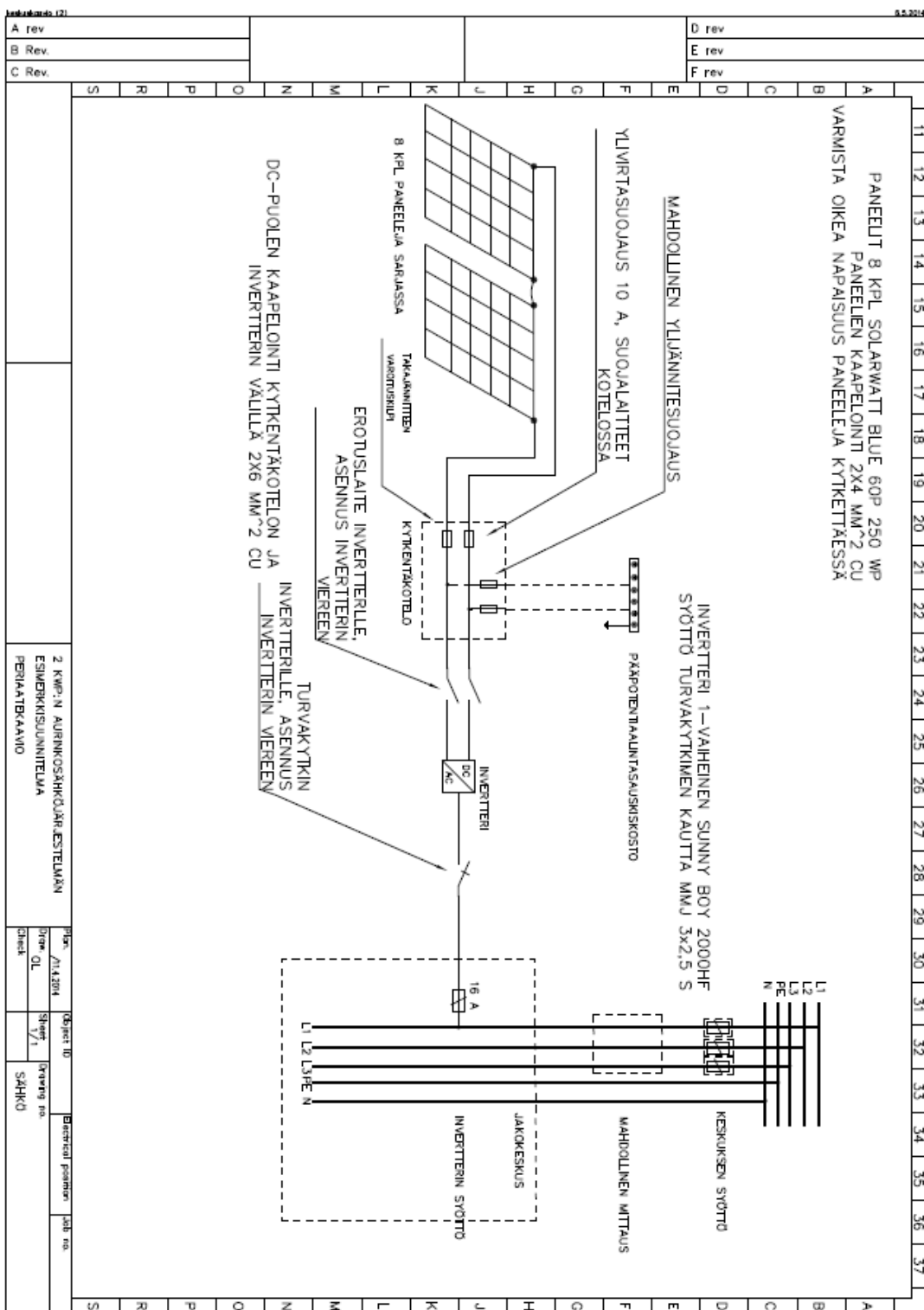
Kaapelityyppi

Solar PV-kaapelit 4 mm² Cu
Solar PV-kaapelit 6 mm² Cu
3x2,5 MMJ

Taulukko 5. Sunnitellun järjestelmän jännitteen alenemat ja tehohäviöt kaapeloinnissa.

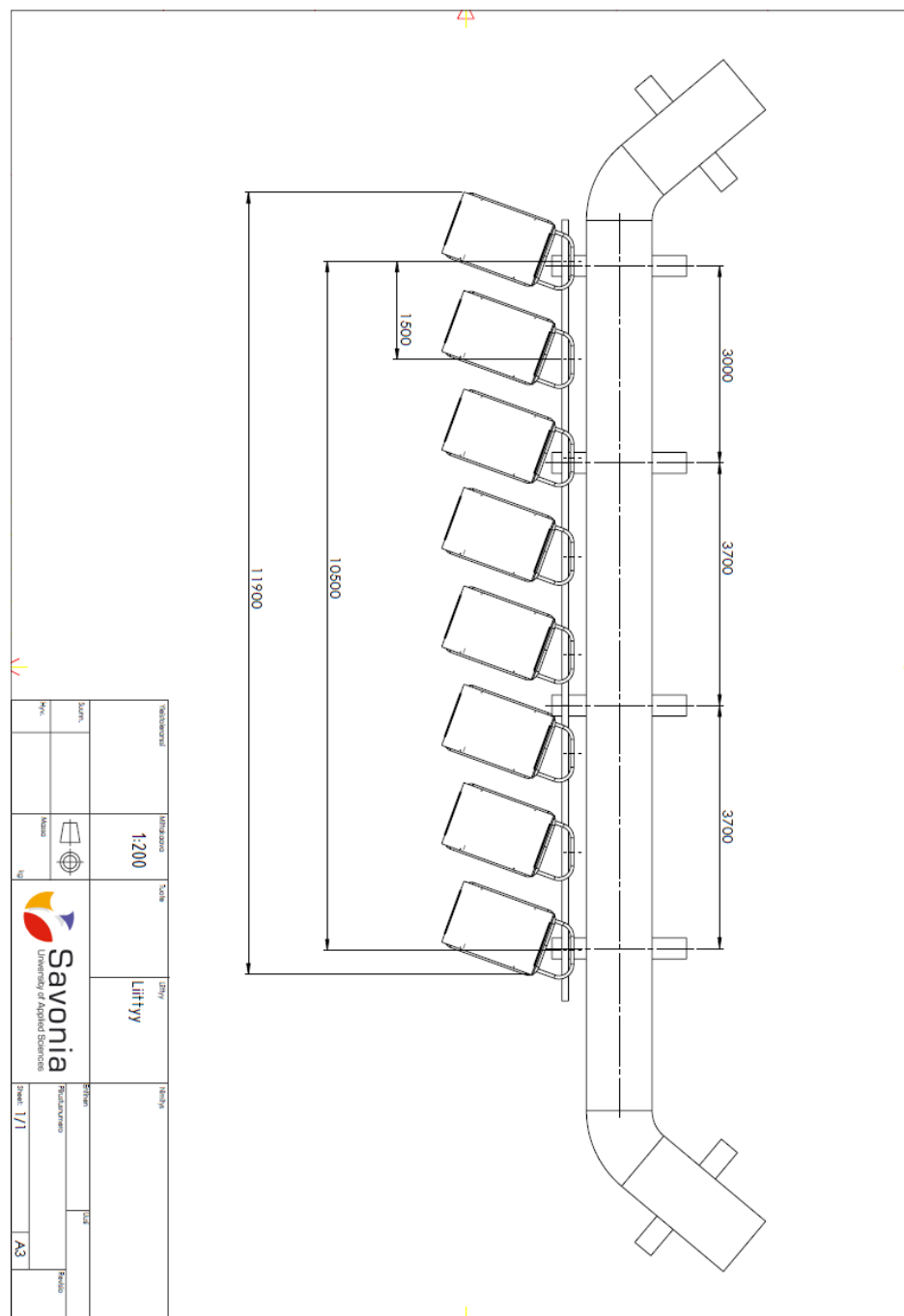
Kaapelointireitti	Pituusarvio kaapeleista (m)	Jännitteen alenema (V)	Tehohäviö (W)	Tehohäviö (%)
Aurinkopaneelit-katon kytkentäkotelo	20	0,74	6,12	0,31
Katon kytkentäkotelo - katon läpivienti	30	0,74	6,12	0,31
Katon läpivienti - kaapelikuiluviedon alapää	30	0,74	6,12	0,31
Kaapelikuilun alapää- siirtymä jakokeskuksen viereen	1	0,02	0,20	0,01
JK:n vierestä-inverteri	6	0,15	1,22	0,06
Inverteri-JK	3	0,18	1,47	0,07
Yhteensä	90	2,57	21,26	1,06
Virta (A)	8,28			
DC-jännite (V)	241,6			

LIITE 3: 2 KWP:N AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN PERIAATEKAAVIO



KUVIO 7. 2 kWp:n aurinkosähköjärjestelmän periaatekaavio.

LIITE 4: MITTAKUVA AURINKOPANEELISTOSTA



KUVA 13. Periaatteellinen mittakuva suunnitellusta aurinkopaneelistosta.