

Aurinkosähköjärjestelmän tuotannon analyysi

Jarkko Honkanen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2018
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä Honkanen, Jarkko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2018
	Sivumäärä 66	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Aurinkosähköjärjestelmän tuotannon analyysi		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaajat Nuutinen Marjukka, Alakangas Juhani		
Toimeksiantaja Solarigo Systems Oy		
Tiivistelmä <p>Aurinkoenergialla on suuri kasvupotentiaali Suomessa. Aurinkoenergian tuotantokapasiteetin kasvua on hidastanut väärä yleiskäsitys aurinkoenergian sopimattomuudesta Suomen pohjoiseen sijaintiin, vaikeasti ennustettavissa oleva ja bioenergiaan panostava energiapolitiikka sekä aurinkovoiman tuotannon epätasaisuus ja vaikea ennustettavuus.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin aurinkosähkön tuotantoa ja tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus toteutettiin vertailemalla aurinkovoimaloiden toteutuneita tuotantoja säteilymääriin perustuviin teoreettisiin laskelmiin. Vertailujen pohjalta tavoitteena oli selvittää oleellisimmat tuotantoon vaikuttavat tekijät. Tavoitteena oli myös selvittää, miten aurinkovoimala tulisi rakentaa, jotta sen energiantuotanto saataisiin maksimoitua. Osana opinnäytetyötä tutkittiin myös älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien toimintaa varjostustilanteissa esimerkkilaskelman avulla.</p> <p>Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin kvantitatiivista tutkimusta. Tutkimuksen aineisto perustuu aurinkovoimaloiden tuotantotietoihin sekä Ilmatieteenlaitoksen avoimen datan palvelusta hankittuihin auringon säteilytietoihin.</p> <p>Tulosten mukaan oleellisimmat aurinkovoimaloiden tuotantoon vaikuttavat tekijät olivat aurinkokennojen lämpötila ja varjostukset. Erot toteutuneen tuotannon ja teoreettisten laskelmien välillä painoutuivat talvi- ja kesäajalle. Talviajan suurin tuotannon menetyksen aiheuttaja oli lumipeite paneelien pinnalla ja kesäaikana aurinkokennojen lämpötila. Tulosten mukaan paneelien ryhmittely on oleellisin huomioitava seikka aurinkovoimaloiden tuotannon maksimoimiseksi. Älykkäisiin voimaloihin liittyvää esimerkkilaskelmaa voidaan hyödyntää harkittaessa investoimista älykkäisiin järjestelmiin.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Aurinkoenergia, aurinkosähköjärjestelmä		
Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)		

Author Honkanen, Jarkko	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 66	Permission for web publication: x
Title of publication Analysing the energy yield of a photovoltaic system		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisors Nuutinen, Marjukka Alakangas, Juhani		
Assigned by Solarigo Systems Oy		
Abstract <p>Solar energy has a great growth potential in Finland. The growth of solar energy production in Finland has been slowed mainly by the erroneous general belief that solar energy does not suit Finland due to our Northern location, unpredictable energy policy whose main focus is in bioenergy and the unevenness and unpredictability of solar power production.</p> <p>The thesis studied the production of photovoltaics and factors that affect the production. The study compared the energy yield of photovoltaic power systems to the theoretical calculations which were based on solar irradiance. The aim of the thesis was to define the most relevant factors that affect the production of photovoltaic power. The thesis also aimed to solve how photovoltaic system should be built to maximize its energy yield. The thesis also used sample calculations to study how a smart photovoltaic system works in partially shaded conditions.</p> <p>The research method of the thesis was quantitative research. The data was based on energy production data on photovoltaic systems and solar irradiance datasets which were collected from the Open Data Services of the Finnish Meteorological Institute.</p> <p>According to the results, the most relevant factors affecting the production of photovoltaic systems were the temperature of the solar cells and shading. Most of the production loss happened in the winter and summer time. In the winter time the energy yield of photovoltaic system was reduced by the snow cover on the surface of the panels and during the summer time by the raised temperature of the solar cells. According to the results, the most relevant thing to consider to maximize the energy yield of a photovoltaic system is the grouping of the panels. The sample calculation on a smart photovoltaic system can be used when investing in smart photovoltaic systems is considered.</p>		
Keywords/tags (subjects) Solar energy, photovoltaic system		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto.....	4
2	Tutkimusasetelma	5
3	Suomen energiamurros	7
4	Aurinkovoima	8
	4.1 Aurinkoenergian perusteet	8
	4.2 Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti	10
	4.3 Aurinkovoima Suomessa	12
	4.3.1 Aurinkovoiman sopivuus Suomen pohjoiseen sijaintiin	12
	4.3.2 Energiapolitiikan merkitys	14
	4.3.3 Aurinkovoiman tulevaisuus Suomessa	16
	4.4 Aurinkosähköjärjestelmä.....	17
	4.4.1 Aurinkosähköjärjestelmän perusteet	17
	4.4.2 Aurinkopaneelit	19
	4.4.3 Invertterit.....	24
5	Tuotantoon vaikuttavat tekijät	27
	5.1 Yleisesti	27
	5.2 Aurinkokennojen lämpötila	28
	5.3 Sääolosuhteet ja sijainti.....	30
	5.4 Varjostukset.....	31
	5.5 Lumen aiheuttamat varjostukset	32
	5.6 Järjestelmän suuntaus ja paneelien kallistuskulma	32
6	Aurinkovoimalan suunnittelu	34
	6.1 Aurinkovoimalaa koskevat vaatimukset.....	36
	6.2 Sähkötekniset standardit.....	37

	2
6.3 Mitoitusperiaate.....	38
6.4 Mitoitustyökalut.....	38
6.5 Tuotannon arviointi.....	39
7 Aurinkovoimalan tuotannon maksimointi.....	39
7.1 Järjestelmän optimaalinen asennus.....	39
7.2 Älykkäät aurinkovoimalat.....	41
7.3 Käytännön esimerkki älykkään ja perinteisen aurinkovoimalan eroista varjostustilanteessa.....	42
8 Teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu.....	46
8.1 Muuramen aurinkovoimala.....	48
8.2 Jämsän aurinkovoimala.....	50
8.3 Muut aurinkovoimalat.....	52
9 Tulosten analysointi.....	53
10 Johtopäätökset.....	56
11 Pohdinta.....	57
Lähteet.....	63
Liitteet.....	66

Kuviot

Kuvio 1. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin 2017.....	7
Kuvio 2. Auringon säteilyenergian kulku ilmakehässä.....	9
Kuvio 3. Aurinkosähkön asennettu kapasiteetti maailmanlaajuisesti vuoden 2016 loppuun mennessä.....	10
Kuvio 4. Aurinkosähkön asennettu kapasiteetti jaoteltuna alueittain.....	12

Kuvio 5. Suomen ja Saksan keskimääräiset säteilymäärät optimaalisessa kulmassa tulevalle pinnalle	13
Kuvio 6. Verkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti Suomessa	16
Kuvio 7. On-grid-järjestelmän rakenne	18
Kuvio 8. Aurinkokennon toimintaperiaate	20
Kuvio 9. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä	22
Kuvio 10. Yksikiteinen ja monikiteinen aurinkopaneeli	23
Kuvio 11. ABB:n valmistama PRO-33.0-TL-OUTD invertteri	25
Kuvio 12. ABB:n valmistaman PRO-33.3-TL-OUTD invertterin lohkoakaavio	25
Kuvio 13. Aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavat tekijät	28
Kuvio 14. Lämpötilan vaikutus aurinkopaneelin ominaiskäyrään	29
Kuvio 15. Aurinkopaneelien toiminta varjostustilanteessa	31
Kuvio 16. Aurinkopaneelin kallistus- ja atsimuuttikulma	34
Kuvio 17. Hajautetulla topologialla toteutettu aurinkovoimala	35
Kuvio 18. Keskitetyllä topologialla toteutettu aurinkovoimala	35
Kuvio 19. Trinasolar TSM-PD05.08S 265 Wp paneelin tekniset ominaisuudet	43
Kuvio 20. Paneelin varjostumistilanne	44
Kuvio 21. Muuramen voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu	50
Kuvio 22. Jämsän voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu	52
Kuvio 23. Muuramen ja Jämsän voimaloiden tuotannon menetykset sekä kuukausien keskilämpötilat	54
Kuvio 24. Lumitilanne Muuramen aurinkovoimalalla 28.3.2018	55
Kuvio 25. Keskimääräisten lämpötilojen ja keskimääräisten lumimäärien välinen riippuvuus	60

Taulukot

Taulukko 1. Esimerkkilaskelman tulokset	45
Taulukko 2. Keskimääräinen kokonaissäteily ja vuoden 2017 kokonaissäteily Jyväskylässä	47
Taulukko 3. Muuramen voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu	49
Taulukko 4. Jämsän voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu	51

1 Johdanto

Jo vuosikymmenten ajan ihmiskunta on ollut tietoinen ilmastonmuutoksen tapahtumisesta. Maapallon lämpötila kohoaa tasaisesti, mikä voi aiheuttaa katastrofaalisia seurauksia esimerkiksi jäätiköiden sulamisen takia. Ilmastonmuutokseen suhtauduttiin pitkään kielteisesti, ja ihmisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt lisääntyvät vielä tänäkin päivänä joka vuosi. Arktisella alueella ilmastonmuutoksen vaikutukset tuntuvat jo selvästi, koska ilmasto lämpenee siellä kaksinkertaisella nopeudella verrattuna maapalloon keskimääräisesti. Hiilidioksidipäästöt ovat suurimmaksi osaksi fossiilisten polttoaineiden, kuten öljyn ja kivihiilen, aiheuttamia. (Forsström 2016, 2.)

Suhtautuminen ilmastonmuutokseen on vakavoitunut 2000-luvulla, mistä konkreettisenä esimerkkinä on vuonna 2016 voimaan astunut Pariisin ilmastopimus. Sopimuksen tavoitteena on pyrkiä toimiin, joilla ilmaston lämpeneminen rajoitettaisiin 1,5 celsiusasteeseen suhteessa esiteolliseen aikaan. Pääministeri Juha Sipilän hallituksen ohjelmassa on asetettu Suomen tavoitteeksi muun muassa uusiutuvan energian osuuden lisääminen 50 prosenttiin loppukulutuksesta sekä hiilen käytön lopettaminen energiantuotannossa vuoteen 2030 mennessä. Uusiutuvien energianlähteiden osuus energian loppukulutuksesta oli vuonna 2016 noin 38 prosenttia, josta valtaosa koostui puupohjaisista polttoaineista. (Huttunen 2017, 11.)

Aurinkoenergialla on suuri kasvupotentiaali Suomessa. Aurinkoenergian tuotantokapasiteetin kasvua on hidastanut muun muassa väärä yleiskäsitys aurinkoenergian sopimattomuudesta Suomen pohjoiseen sijaintiin, vaikeasti ennustettavissa oleva ja bioenergiaan panostava energiapolitiikka sekä aurinkovoiman tuotannon epätasaisuus ja vaikea ennustettavuus.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Suomen johtaviin aurinkovoimalatuottajiin kuuluva Solarigo Systems Oy. Toimeksiantajan liiketoiminta perustuu asiakkaiden ja toimeksiantajan välisiin pitkäaikaisiin aurinkosähkösopimuksiin täyden palvelun periaatteella. Toimeksiantaja omistaa aurinkovoimalat ja asiakas maksaa vain käyttämästään aurinkosähköstä, jolloin toimeksiantaja on vastuussa voimaloiden optimaalisesta toiminnasta.

Aurinkovoima lisääntyy Suomessa kovalla vauhdilla, mikä tekee aiheesta erittäin ajankohtaisen. Aurinkovoiman tuotanto on riippuvainen monesta tekijästä, jotka tuovat haasteita muun muassa aurinkovoiman tuotannon arvioimiseen. Jos ymmärretään tuotantoon vaikuttavat tekijät, voidaan helpottaa aurinkovoimaloiden suunnittelu- ja asennusvaiheessa tehtäviä päätöksiä, jotta voimala saadaan toimimaan optimaalisesti ja tuotanto maksimoitua.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää aurinkovoimaloiden tuotantoon vaikuttavat tekijät ja tutkia, mitkä tekijät ovat oleellimmat voimaloiden tuotannon kannalta. Opinnäytetyössä pyrittiin myös tutkimaan, mitä ratkaisuja aurinkovoimaloiden suunnittelu- ja asennusvaiheessa voidaan tehdä, jotta voimaloilla saavutetaan maksimaalinen tuotto.

Osana opinnäytetyötä oli myös perehtyminen viime vuosina markkinoille tullessiin älykkäisiin aurinkovoimaloihin. Älykkäiden aurinkovoimaloiden komponenttien valmistajat lupaavat järjestelmien tuotantoon selkeitä parannuksia. Älykkäiden järjestelmien vaikutuksia järjestelmien tuotantoon pyrittiin tutkimaan esimerkkilaskelman avulla. Esimerkkilaskelman tavoitteena oli selvittää, miten yksi osittain varjostunut paneeli vaikuttaa koko paneeliketjun tuottamaan tehoon, jännitteeseen ja virtaan, kun käytössä on perinteinen järjestelmä ja älykäs järjestelmä. Älykkäitä järjestelmiä ei ole käsitelty aikaisemmin Suomessa tehdyissä tutkimuksissa.

2 Tutkimusasetelma

Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla kymmenen aurinkovoimalan toteutuneita tuotantomääriä ja auringon säteilymääriin perustuvia teoreettisia tuotantomääriä. Tutkimusjaksona käytettiin vuotta 2017. Vertailujen pohjalta tarkoituksena oli tutkia, miten toteutunut tuotanto eroaa säteilymääriin perustuvasta teoreettisesta tuotannosta ja mistä mahdolliset erot johtuvat.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta. Tutkimusmenetelmä on selvästi kvantitatiivinen, koska tutkimuksen aineisto perustuu numeraalisiin tuotantotietoihin ja tutkimuksen tulokset esitetään numeraalisesti. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa korostuu tiedon perustelu, luotettavuus, objektiivisuus ja yksiselitteisyys. Kvantitatiivisen tutkimuksen tavoitteena on saavuttaa

perusteltuja, luotettavia ja yleistettäviä tuloksia. Kvantitatiivisen tutkimuksen edellytyksenä on, että tutkittavasta ilmiöstä löytyy jo valmista tietoa. (Kananen 2011, 18.) Tässä tapauksessa se tarkoittaa sitä, että aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavat tekijät täytyy tuntea, jotta tekijöiden vaikutusta tuotantoon voidaan mitata. Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään selkeitä syy-seuraussuhteita toteutuneen tuotannon ja tuotantoon vaikuttavien tekijöiden välillä, mikä on ominaista kvantitatiiviselle tutkimukselle.

Kvantitatiiviseen, kuten muihinkin tutkimuksiin, kuuluu oleellisena osana tutkimusongelman määrittäminen sekä tutkimusongelmasta johdetut tutkimuskysymykset. Jotta tutkimusongelma saadaan ratkaistua, tulee tutkimuskysymysten olla oikeanlaisia. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa tutkimuskysymysten avulla tuotetaan numeerisia arvoja, mutta arvot ovat pelkkiä mekaanisten laskelmien tuloksia. Tämän vuoksi pelkkien lukuarvojen pohjalta ei syy-seuraus-suhteita voida aina todeta. (Kananen 2011, 26-28.)

Tässä opinnäytetyössä tutkimusongelmana oli toteutuneen tuotannon erot säteilymäärään perustuvaan teoreettiseen tuotantoon. Tämän tutkimusongelman pohjalta tutkimuskysymyksiksi muodostuivat seuraavat kysymykset:

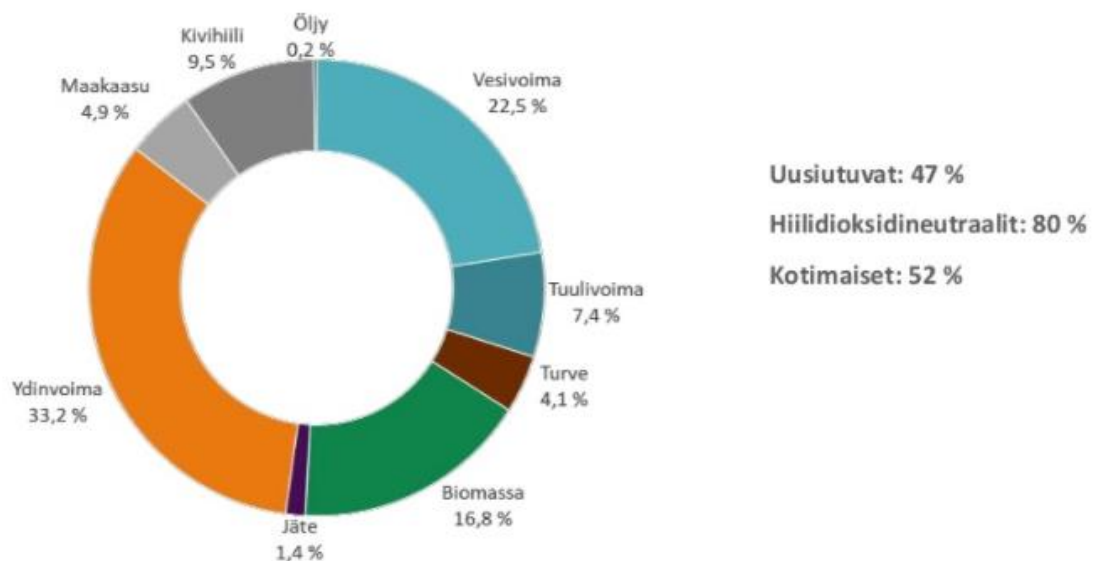
- Mitkä tekijät vaikuttavat aurinkovoimaloiden tuotantoon?
- Miten aurinkovoimala tulisi rakentaa, jotta sen tuotanto saataisiin maksimoitua?
- Mikä vaikutus tuotantoon saavutetaan älykkäällä järjestelmällä?

Opinnäytetyö rajattiin siten, että se palvelee mahdollisimman hyvin toimeksiantajan liiketoimintaa. Tämä tarkoittaa, että työssä keskityttiin ensisijaisesti kattoasennuksena toteutettuihin ja sähköverkkoon liitettyihin teollisuuskokoluokan aurinkovoimaloihin. Teollisuuskokoluokan voimaloiksi käsitetään voimalat, joiden nimellisteho on vähintään $10 kW_p$ (Erat, Hänninen, Nyman, Rasinkoski, Tahkokorpi & Wiljander 2016, 162). Opinnäytetyötä voidaan kuitenkin soveltaa myös pienempiin aurinkosähköjärjestelmiin, koska tuotantoon vaikuttavat tekijät ovat samat voimalan koosta riippu-

matta. Opinnäytetyössä ei käsitelty aurinkolämpöä, koska se ei kuulu toimeksiantajan liiketoimintaan eikä aurinkolämpöä ollut tarpeellista käsitellä tämän tutkimuksen yhteydessä.

3 Suomen energiamurros

Energiamurros on globaali ilmiö, jolla tarkoitetaan energiantuotannon muuttumista ympäristöystävällisempään muotoon. Suomessa energiamurroksen seurauksena ympäristönäkökulmallisesti kestävämmien energiantuotantomuotojen osuus pienenee entisestään energiantuotannossa. Esimerkiksi kivihiilen käyttäminen primäärienergianlähteenä pyritään lopettamaan Suomessa vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2017 Suomen sähköntuotannosta noin 9,5 prosenttia tuotettiin kivihieillä (ks. kuvio 1). Lisäksi osa Suomen vanhasta voimalaitoskapasiteetista todennäköisesti poistuu energiajärjestelmästä, koska vanhojen voimalaitosten päivittäminen vastaamaan tämän päivän päästörajoituksia tai monimuotoisia polttoaineita on taloudellisesti kannattamatonta. (Mäkinen 2017, 1.)



Kuvio 1. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin 2017 (Energiavuosi 2017 – sähkö 2018, 12.)

Kuviossa 1 on esitetty Suomen sähköntuotanto energialähteittäin. Noin kolmasosa (33,2 %) tuotetusta sähköstä tuotettiin ydinvoimalla. Uusiutuville energialähteillä tuotettiin liki puolet (47 %) sähköntuotannosta. Uusiutuviin energialähteisiin diagrammissa kuuluvat vesivoima, tuulivoima ja biomassa. Aurinkovoiman osuus on toistaiseksi niin marginaalinen, että sitä diagrammissa ei näy. (Energia vuosi 2017 – sähkö 2018, 12.)

Energiamurrokseen voi vaikuttaa myös muun muassa sähkön siirtomaksujen nousu. Sähkön siirtomaksut ovat nousseet ja nousevat tulevaisuudessakin, koska Suomen alkuperäinen sähköverkko alkaa olla käyttöikänsä päässä. Sähköverkkojen toimintavarmuutta joudutaan parantamaan kallein investoinnein, mistä seuraa sähkön siirtomaksujen nouseminen. Siirtomaksujen noustessa kiinnostus sähkön pientuotantoon lisääntyy. (Mäkinen 2017, 1.)

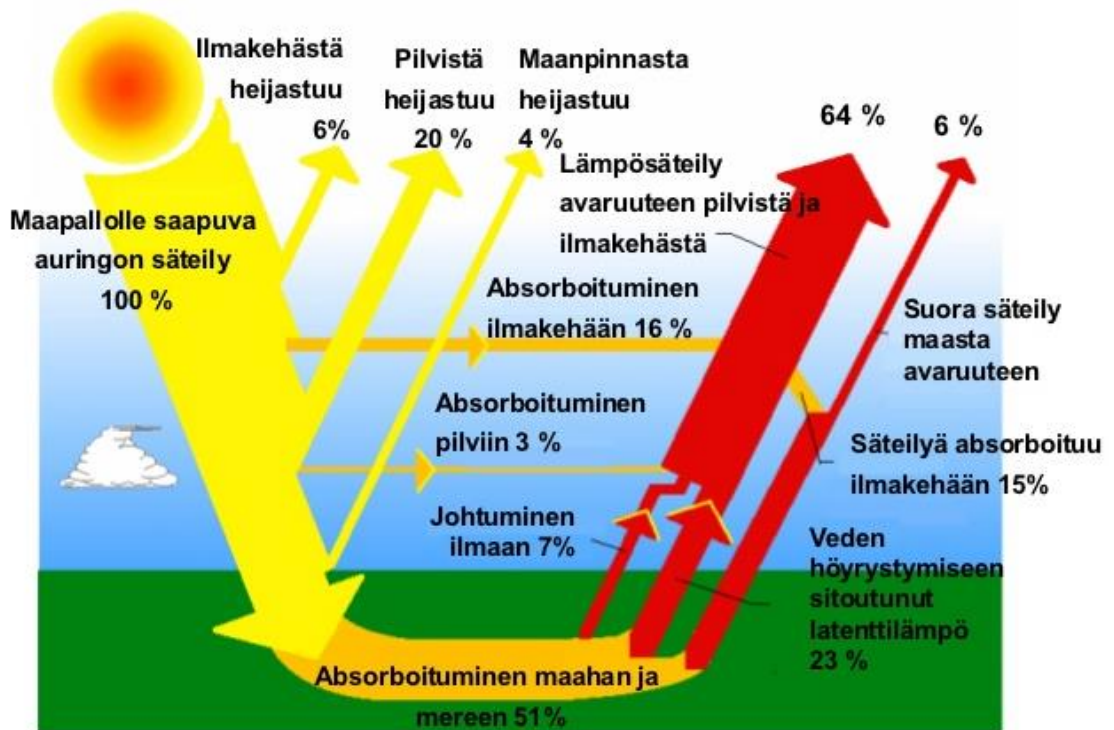
Vuonna 2017 Suomessa tuotettiin sähköä 65 TWh sähkön kulutuksen ollessa 85,5 TWh. Sähkön kulutuksen ja tuotannon välinen erotus korvataan tuontisähköllä, joka vuonna 2017 oli 20,5 TWh. Tuontisähkö tulee pääasiassa muista Pohjoismaista ja Venäjältä. Vuonna 2017 tuontisähköä tuotiin Pohjoismaista noin 15,5 TWh ja Venäjältä noin 5 TWh. (Energia vuosi 2017 – sähkö 2018, 20.)

4 Aurinkovoima

4.1 Aurinkoenergian perusteet

Auringon säteilemä energia perustuu fuusioreaktioon, jossa vety- ja heliumytimet yhdistyvät äärimmäisen korkeassa lämpötilassa. Reaktiosta maapallolle säteilevä energiamäärä on monituhatkertainen suhteessa ihmiskunnan energiankulutukseen. Kun huomioidaan tämän hetkisen energiantuotannon negatiiviset vaikutukset ympäristölle, edessämme on haastava, mutta mielenkiintoinen tehtävä muuttaa maapallon energiantuotanto ympäristöystävälliseksi. Tässä tehtävässä aurinkoenergian hyödyntäminen on merkittävää. (Häberlin 2012, 27.)

Aurinkosähkön tuotanto perustuu auringon säteilyyn, valosähköiseen ilmiöön ja puolijohdemateriaalien ominaisuuksiin. Auringon säteily määrä ilmakehän ulkorajalla on noin $1367\text{--}1370 \frac{W}{m^2}$. Tätä arvoa kutsutaan aurinkovakioksi, joka määrittää säteilyn intensiteetin teoreettisen ylärajan maan pinnalla. Käytännössä säteilyn intensiteetti maan pinnalla on noin $1000 \frac{W}{m^2}$, koska osa auringon säteilystä absorboituu eli imeytyy ilmakehään (ks. kuvio 2). Säteily määrään maan pinnalla vaikuttavat ilmakehän olosuhteet sekä maantieteellinen sijainti. Aurinkosähkösovelluksissa tarkastellaan auringon kokonaissäteilyä, joka koostuu auringon suorasta säteilystä sekä pilvien, ilmakehän ja maan heijastamasta hajasäteilystä. Suomessa vuotuinen kokonaissäteily määrä on Etelä-Suomessa keskimäärin noin $980 \frac{kWh}{m^2}$ ja Pohjois-Suomessa noin $750 \frac{kWh}{m^2}$. (Lehto, Liuksiala, Lähde, Olenius, Orrberg & Ylinen 2017, 9–10.)

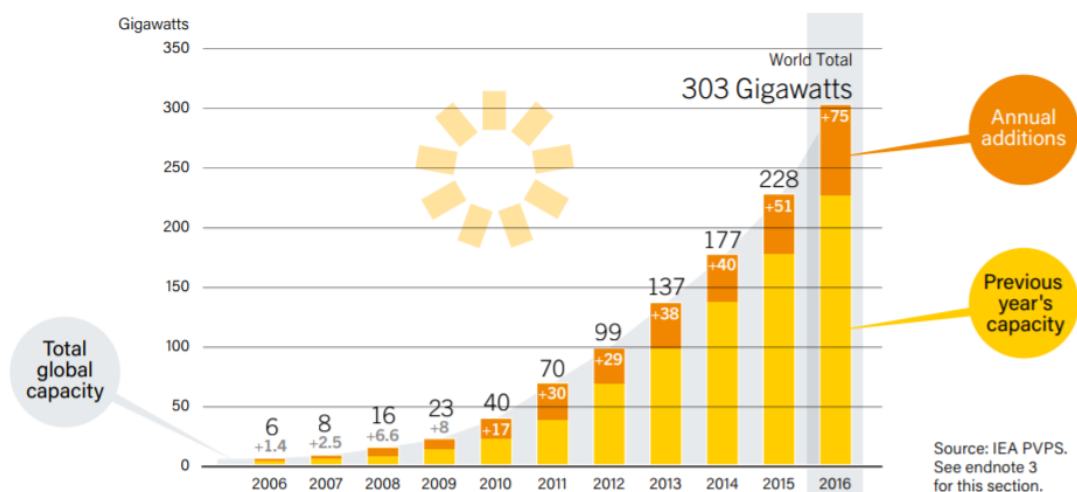


Kuvio 2. Auringon säteilyenergian kulku ilmakehässä (Ilmastonmuutos ja energia 2010, 5.)

Aurinkosähkö on yksi ympäristöystävällisimmistä energiantuotantomuodoista. Aurinkosähkön parhaita ominaisuuksia ovat aurinkosähköjärjestelmien luotettavuus, huoltovapaus ja ympäristöön sulautuvuus muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna. Aurinkosähkön tuottamiseen ei tarvita polttoainetta, eikä tuotannosta aiheudu ääntä tai päästöjä. Hyödyntämättöminä olevat kattoalueet voidaan muuttaa puhtaan energian tuotantoalueiksi. Aurinkosähkön huonoina puolina voidaan pitää tuotannon vaihtelevuutta ja kalliita investointihintoja. Aurinkosähköä ei voida tuottaa yöllä, minkä johdosta aurinkosähkö tarvitsee rinnalleen muita energiantuotantomuotoja. Aurinkosähkön varastoiminen akkuihin ei vielä toistaiseksi ole kustannustehokasta, etenkin Suomessa. (Solar PV n.d.)

4.2 Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti

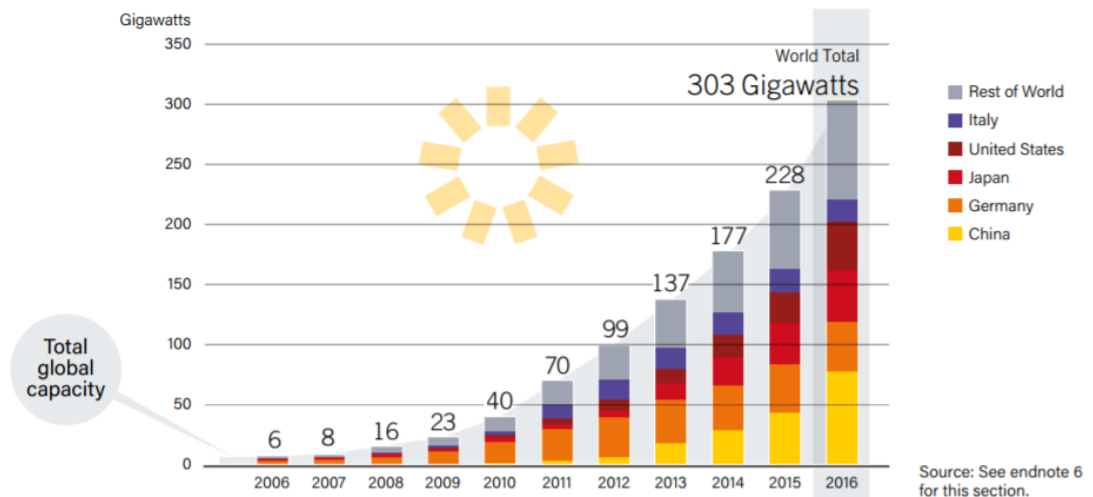
Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti on kasvanut eksponentiaalisesti viimeisen vajaan kymmenen vuoden aikana. Tähän on vaikuttanut oleellisesti aurinkosähkön kilpailukyvyyn parantuminen muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna sekä aurinkosähkön potentiaali energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen pienentämisessä.



Kuvio 3. Aurinkosähkön asennettu kapasiteetti maailmanlaajuisesti vuoden 2016 loppuun mennessä (Renewables 2017 Global Status Report 2017, 66.)

Kuviossa 3 on esitetty aurinkosähkön maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti sekä vuosittaiset asennusmäärät. Keltainen pylväsdiagrammi kuvaa edellisen vuoden kapasiteettia ja oranssi pylväsdiagrammi kyseisenä vuonna asennettua kapasiteettia. Vuoden 2016 aikana, aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi noin 75 GW_p , mikä vastaa yli 31 000 aurinkopaneelin asentamista joka tunti. Aurinkosähkön tuotantokapasiteettia asennettiin vuoden 2016 aikana enemmän, kuin koko maapallon aurinkosähkön kapasiteetti oli viisi vuotta aiemmin. (Renewables 2017 Global Status Report 2017, 63.)

Aurinkosähkön nopea asennuskapasiteetin nousu maailmalla perustui vielä muutamia vuosia sitten suurimmaksi osaksi uusiutuvan energian tuottamiseen liittyviin tukiiin. Tukien avulla aurinkosähkön tuottamisesta tehtiin niin kannattavaa, että esimerkiksi Saksassa monet maatilalliset päättivät alkaa aurinkosähkön pientuottajiksi. Aurinkosähkön suuri asennusmäärä on laskenut aurinkosähköjärjestelmien komponenttien hintoja, mikä on parantanut aurinkosähkön kustannustehokkuutta. Nykyisin aurinkosähköinvestoinnit eivät ole enää täysin tuista riippuvaisia, vaan taloudellisesti perusteltuja. Monissa maissa aurinkosähkö onkin jo edullisempaa, kuin fossiililla polttoaineilla tuotettu sähkö. (Renewables 2017 Global Status Report 2017, 63–65.)



Kuvio 4. Aurinkosähkön asennettu kapasiteetti jaoteltuna alueittain (Renewables 2017 Global Status Report 2017, 66.)

Kuviossa 4 on esitetty aurinkosähkön tuotantokapasiteetit alueittain jaoteltuna. Aurinkosähkön suurimpiin tuottajiin kuuluvat tällä hetkellä Kiina, Japani, Saksa, Yhdysvallat ja Italia, joista Kiina on tällä hetkellä ylivoimaisesti suurin. Kiina on kasvattanut aurinkosähkökapasiteettinsa 11-kertaiseksi vuoteen 2012 verrattuna.

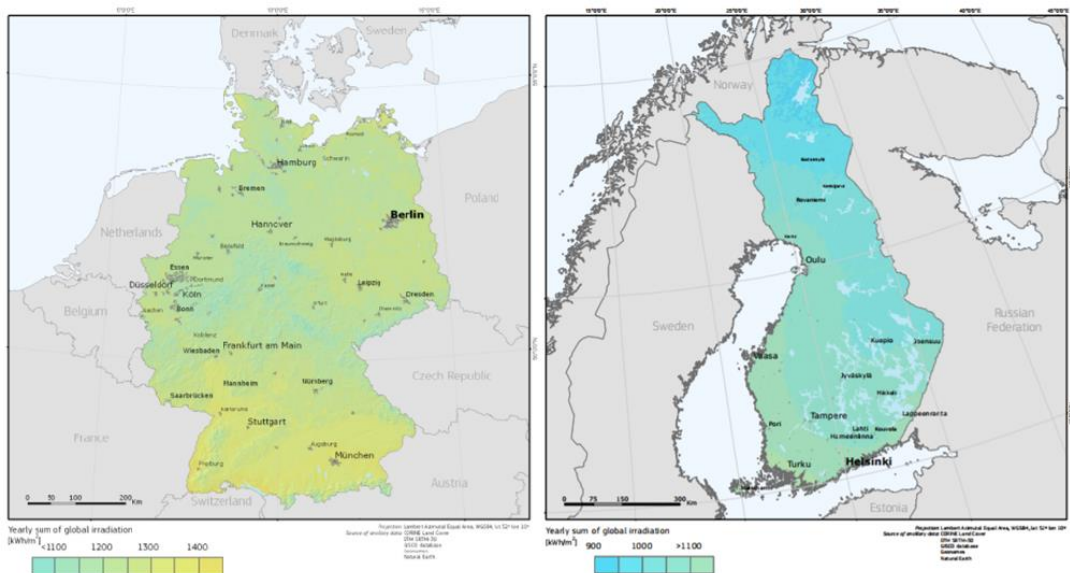
4.3 Aurinkovoima Suomessa

4.3.1 Aurinkovoiman sopivuus Suomen pohjoiseen sijaintiin

Aurinkovoima sopii hyvin Suomeen maan pohjoisesta sijainnista huolimatta. Pohjoisen sijainnin vuoksi aurinkosähkön tuotanto painottuu kuitenkin keväästä syksyyn, joten aurinkosähköllä ei voida vastata Suomessa talven kapasiteettihaasteeseen. Kesällä aurinkosähköä voidaan tuottaa optimaaliseen aikaan. Aurinkoisina kesäpäivinä kiinteistöjen sähkön kulutus on korkeimmillaan jäähdytystarpeen vuoksi. Samaan aikaan toteutuvat myös aurinkovoimaloiden tuotannon huiput. Erityisen hyvin aurinkovoima sopii esimerkiksi ruokakaupan sähkön lähteeksi. Kaupan sähkönkulutus on kesällä jäähdyttämisen ja kylmälaitteiden käytön johdosta suurimmillaan silloin, kun aurinko paistaa (K-ryhmästä Suomen suurin aurinkosähkön tuottaja 2016). Aurinkovoi-

maloiden tuotannon rajoituksessa Suomessa kevästä syksyyn, on oleellista nähdä aurinkoenergia osana energiajärjestelmää, joka koostuu monesta toisiaan tukevasta energiantuotantomuodosta. (Auvinen, Lovio, Jalas, Juntunen, Liuksiala, Nissilä & Müller 2016, 17–18.)

Aurinkosähkön ylivoimaisesti suurin tuottaja Euroopassa on Saksa, jossa aurinkosähkön asennettu kapasiteetti vuonna 2016 oli noin 41 340 MW_p (Renewable Energy Sources in Figures 2017, 44). Suomessa asennettu aurinkosähkökapasiteetti vuonna 2016 oli puolestaan vain noin 27 MW_p (Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertaistui vuodessa 2017).



Kuvio 5. Suomen ja Saksan keskimääräiset säteilymäärät optimaalisessa kulmassa tu-
levalle pinnalle (Country and regional maps 2017, muokattu.)

Kuviossa 5 on esitetty sekä Suomen että Saksan keskimääräiset säteilymäärät optimaalisessa kulmassa olevalle pinnalle vuoden ajalta. Kuvista voidaan tulkita, että Etelä-Saksaa lukuun ottamatta Saksan keskimääräiset säteilymäärät ovat likimain yhtä suuret kuin Suomen rannikkoalueen keskimääräiset säteilymäärät.

4.3.2 Energiapolitiikan merkitys

Ero Saksan ja Suomen välisessä aurinkovoiman tuotantokapasiteetissa johtuu pääosin maiden energiapolitiikan eroista. Saksa aloitti uusiutuvan energian vallankumouksen tukemalla uusiutuvaa energiaa syöttötariffijärjestelmällä. Syöttötariffilla tarkoitetaan sitä, että uusiutuvan energian tuottajalle taataan sähköstä tietty takuu-hinta, kun sähköä myydään sähköverkkoon. Tyypillisesti syöttötariffijärjestelmän aiheuttamat kustannukset katetaan Euroopassa kansalaisten sähkölaskun yhteydessä. Saksassa syöttötariffijärjestelmän myötä kotitalouksien sähkölaskut ovat kasvaneet keskimäärin noin kaksinkertaisiksi vuodesta 2007 vuoteen 2016. Sähkölaskujen kaksinkertaistuminen on seurausta siitä, että syöttötariffijärjestelmä oli aluksi liian avokätinen aurinkosähkötekniikan korkean hintatason johdosta ja toisaalta Saksan päättäjät eivät osanneet varautua uusiutuvan energian räjähdysmäiseen kasvuun. (Ball 2017.)

Suomen energiapolitiikka suosii uusiutuvien energianlähteiden osalta vahvasti puupohjaista bioenergiaa. Aurinkovoima on lähtenyt Suomessa hyvin hitaasti liikkeelle. Puupohjainen energia ei yksin riitä toteuttamaan suomalaista energiamurrosta, koska puuta ei ole tarpeeksi ja sille on järkevämpääkin käyttöä. Oleellista on myös huomioida, ettei puupohjaista bioenergiaa voida pitää uusiutuvana energianlähteenä täysin yksiselitteisesti. Puuta pidetään hiilineutraalina, koska puu sitoo hiiltä kasvaessaan yhtä paljon, kuin sen polttamisesta energiantuotannossa vapautuu. On kuitenkin täysin mahdollista, että etenkin pitkällä aikavälillä puuta ei enää käsitellä päästölaskennan osalta täysin hiilineutraalina energianlähteenä. (Salo 2015, 115.)

Tukijärjestelmä, jonka aiheuttamat kustannukset peritään kuluttajien sähkölaskujen yhteydessä välittömästi takaisin, on Salon (Salo 2015, 130) mukaan monin tavoin parempi kuin valtion budjetin kautta katettu tukijärjestelmä. Valtion rahoittama tukijärjestelmä tuo investointiympäristöön epävarmuutta, koska tukien määrä on riippuvainen taloustilanteesta ja täten vaikeasti ennustettavissa pitkällä aikavälillä. Kuluttaja pystyy myös itse vaikuttamaan maksamaansa lisähintaan sähkön kulutuksensa kautta. Ideaalitalanteessa tämä johtaisi myös kotitalouksien energiatehokkuuden parantamiseen. (Salo 2015, 130.)

Suomessa syöttötariffijärjestelmä on tällä hetkellä käytössä tuulivoimaan, metsähakkeeseen, biokaasuun ja puupolttoaineeseen perustuvissa sähkön tuotantomuodoissa (Tuotantotuki n.d). Valtiovarainministeriön mukaan täysin kuluttajien sähkölaskujen kautta maksettava syöttötariffijärjestelmä on Suomen perustuslain vastainen, joten Suomessa syöttötariffijärjestelmän rahoitus on sisällytetty valtion budjettiin. Perustuslainvastaisuutta on perusteltu sillä, että teollisuudelle jouduttaisiin luomaan kevennyksiä syöttötariffimaksuihin kilpailukyvyn ylläpitämiseksi, jolloin järjestelmä rikkoisi perustuslain yhdenvertaisuusperiaatetta. (Salo 2015, 130.)

Aurinkovoiman osalta syöttötariffijärjestelmä ei ole käytössä, vaan energiatuki perustuu investointitukeen, jonka määrä yrityksille, kunnille, seurakunnille ja säätiöille vuonna 2018 on 25 % kokonaisinvestoinnista. Tuen myöntää Business Finland, joka syntyi vuoden 2018 alussa Finpron ja Tekesin yhdistyessä (Business Finland n.d). Maatiloille tehtävien aurinkovoimalainvestointien tuki on 35 % kokonaisinvestoinnista ja kotitalouksiin asennettujen aurinkosähköjärjestelmien asennustöistä saa 40 % kotitalousvähennyksinä. Käytännössä tämä tarkoittaa noin 14–18 %:n tukea kokonaisinvestoinnista (Aurinkoenergiainvestointien tuet 2016).

Energiatuella on vielä toistaiseksi suuri merkitys aurinkovoiman lisääntymiseen Suomessa. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetin nopean kasvun edellytyksenä on, että aurinkovoimaloilla tuotettu sähkö olisi kannattavaa myydä sähköverkkoon. Tällöin myös kotitalouksien olisi viisasta investoida aurinkovoimaan. (Salo 2015, 131–132.)

Nykymuotoinen järjestelmä ei edesauta aurinkovoiman kasvua tarpeeksi, joten järjestelmää on kehitettävä. Aurinkosähkön osalta käyttöön tulisi ottaa syöttötariffijärjestelmä tai keksiä jokin muu keino tehdä aurinkosähkön myymisestä sähköverkkoon kannattavaa. Perustuslainvastaisuus syöttötariffijärjestelmän kustannusten kattamisessa kuluttajien sähkölaskujen yhteydessä tulisi myös tutkia, koska EU:n mallin mukainen syöttötariffijärjestelmä on vakaampi, kuin valtion budjettiin sidottu järjestelmä. Toinen vaihtoehto voisi olla esimerkiksi Tanskan mallin mukainen nettomittarointi. Nettomittaroinnilla tarkoitetaan käytännössä sitä, että pientuottajan ylijäämä-sähkö vähennetään suoraan tämän ostosähkön määrästä. Pientuottaja maksaa sähköstä siis vain nettokulutuksensa verran. Tanskan mallissa nettomittarointi käsittää

koko sähkön hinnan eli itse sähkön, sähköverot ja siirtomaksut. Ongelma nettomittaroinnissa Suomen osalta ovat juuri sähköverot sekä siirtomaksu. Niitä ei todennäköisesti nykylainsäädännön puitteissa voitaisiin netottaa. (Salo 2015, 136.)

4.3.3 Aurinkovoiman tulevaisuus Suomessa

Aurinkovoiman kapasiteetin odotetaan kasvavan tulevaisuudessa. Kuviossa 6 on esitetty aurinkosähkökapasiteetti Suomessa vuoden 2016 loppuun mennessä, sekä kasvuennuste vuosille 2017 ja 2018. Ennusteen mukaan kapasiteetti kaksinkertaistuu vuosittain ainakin vuoden 2018 loppuun mennessä. Kapasiteetin kasvu kertyy pääsääntöisesti yritysten tekemistä aurinkosähköinvestoinneista Suomen tukijärjestelmästä johtuen. Kapasiteetin viime vuosien nopeasta kasvusta huolimatta aurinkovoima on Suomessa edelleen marginaalinen energiantuotantomuoto, vaikka lähes sata prosenttia suomalaisista kannattaa aurinkosähkön lisäämistä. (Aurinkosähkö kasvaa rajusti lähivuodet – Suomi kirii, mutta Ruotsi menee vauhdilla edelle 2017.)



Kuvio 6. Verkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti Suomessa (Aurinkosähkö kasvaa rajusti lähivuodet – Suomi kirii, mutta Ruotsi menee vauhdilla edelle 2017.)

Aurinkovoiman kapasiteetin nopean kasvun suurin haaste on tehdä aurinkosähkön pientuotannosta kannattavaa. Aurinkovoima on tällä hetkellä Suomessa parhaimmillaan kauppojen ja tehtaiden yhteydessä, missä tuotettu sähkö voidaan käyttää tehokkaasti omassa kiinteistössä. Jos syöttötariffijärjestelmä tai nettomittarointi tulee käyttöön, on todennäköistä, että aurinkovoiman tuotantokapasiteetti lähtee Suomessa nopeaan nousuun. Jos Suomessa ei tehdä tarvittavia muutoksia tukijärjestelmään ylijäämänsähkön kannattavuuden parantamiseksi, joudutaan edelleen odottamaan sähkön varastointitekniikoiden kehittymistä ja hintojen alentumista.

Yleinen väite on, että aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvaessa aurinkosähkö aiheuttaa sähköverkolle ylivoimaisia ongelmia. Kyseinen väite ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti voitaisiin nostaa noin $3 GW_p$:iin ilman minkäänlaisia muutoksia sähköverkossa. Suurin osa tämän kapasiteetin tuotannosta pystyttäisiin hyödyntämään erilaisissa jäähdytystä vaativissa toiminnoissa ja loppu korvaisi kesäajan fossiilista sähkön tuotantoa. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetin ylittäessä $5 GW_p$ aurinkovoima vähentäisi ajoittain perussähkön tarvetta. Tämä raja on siltä osin merkittävä, että perussähkön tarpeen vähentyessä Suomen ydinvoimaloita jouduttaisiin ajamaan pienemmällä teholla, mikä ei ole taloudellisessa mielessä viisasta. (Erat ym. 190–191.)

4.4 Aurinkosähköjärjestelmä

4.4.1 Aurinkosähköjärjestelmän perusteet

Aurinkosähköjärjestelmät voivat olla verkkoon kytkettyjä järjestelmiä (on-grid) tai verkkoon kytkemättömiä järjestelmiä (off-grid). Maailmanlaajuisesti on-grid-järjestelmät ovat yleisimpiä. Off-grid-järjestelmät soveltuvat paikkoihin, joissa yleistä sähköverkkoa ei ole saatavilla, kuten esimerkiksi saarissa sijaitsevat kesämökit. On-grid- ja off-grid-järjestelmien kokoonpanot eroavat toisistaan siten, että off-grid-järjestelmä tarvitsee toimiakseen paikallisen energiavaraston eli akuston ja on-grid-järjestelmät sähköverkkoon liittymiseen vaadittavat toiminnot. (Lehto ym. 2017, 43.) Tässä työssä keskitytään verkkoon kytkettyihin aurinkosähköjärjestelmiin.

Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä toimii sähköverkon rinnalla. Käytännössä sähköverkko toimii aurinkosähköjärjestelmän energiavarastona. Järjestelmän tuotannon ollessa suurempi kuin kohteen kulutus syötetään ylijäämä sähköverkkoon. On-grid-järjestelmien pääkomponentit ovat aurinkopaneelit telineineen sekä invertterit eli vaihtosuuntaajat lisälaitteineen. Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä ja inverttereiden tehtävä on muuttaa tasasähkö vaihtosähköksi sekä huolehtia siitä, että sähkön laatu vastaa jakeluverkon standardeja. (Lehto ym. 2017. 43.)



Kuvio 7. On-grid-järjestelmän rakenne (Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2016.)

Kuviossa 7 on esitetty verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne. Aurinkopaneelit kytketään sarjaan samankokoisiin paneeliketjuihin, joita kutsutaan yleensä stringeiksi. Aurinkopaneelien sarjaan kytkentä tapahtuu kiinteillä johtimilla ja kosteussuojatuilla liittimillä, jotka ovat tyypillisesti aina paneeleissa valmiina. Aurinkopaneelit kytketään verkkoinverttereiden seurantapiireihin tyypillisesti poikkipinta-alaltaan 6 mm^2 :n aurinkopaneelikaapeleilla. Invertterit kytketään sähköpääkeskuksen syöttöpuolelle, josta tuotanto joko menee omaan kulutukseen tai myydään sähköverkkoon. (Käpylehto 2016, 71–73.)

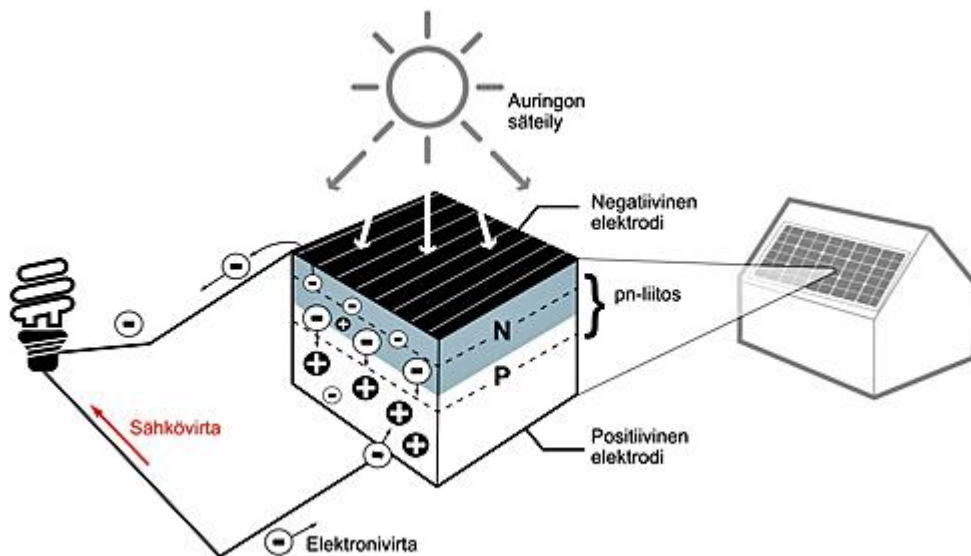
On-grid-järjestelmä tulee olla varustettu saarekekäytön estolla. Saarekekäyttö tarkoittaa aurinkosähköjärjestelmän käyttämistä varavoimana. Käytännössä tällä tarkoi-

tetaan sitä, että järjestelmä lopettaa sähkön syötön, jos sähköverkko katoaa tai järjestelmän toiminnassa esiintyy häiriöitä. Saarekekäyttö on sallittu vain siinä tapauksessa, että erikoistoimenpiteillä on varmistettu, että järjestelmä ei syötä yksinään yleistä verkkoa aiheuttaen vaaraa jakeluverkon puolelle. (Lehto ym. 2017. 44.)

4.4.2 Aurinkopaneelit

Nykyiset kaupalliset aurinkopaneelit koostuvat useimmiten sarjaan kytketyistä yksitai monikiteisistä piikenoista. Auringon säteilyenergiaa kuljettavia hiukkasia kutsutaan fotoneiksi. Fotonien osuessa aurinkokennoihin, saavat ne aikaan puolijohdemateriaalissa elektroni-aukko-pareja ja sitä kautta sähkövirran valosähköisen ilmiön mukaisesti. Puolijohteiksi kutsutaan sellaisia alkuaineita ja yhdisteitä, jotka johtavat virtaa huomattavasti nopeammin kuin johteet, mutta paremmin kuin eristeet. Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan säteilyn kykyä irrottaa elektroneja. (Lehto ym. 2017, 10–13.)

Sähkövirta syntyy aurinkokennon pn-liitoksessa. Aurinkokennon toimintaa varten puolijohdemateriaalia (tyypillisimmin piitä) jalostetaan siten, että puolijohteelle saadaan aikaan erilaiset ominaisuudet, joita kutsutaan p-tyypiksi ja n-tyypiksi. Kun piitä seostetaan esimerkiksi fosforilla, muodostuu materiaaliin ylimääräisiä varauksenkuljettajia, jotka parantavat sen johtavuutta. Tätä negatiivisen varauksen omaavaa materiaalia kutsutaan n-aineeksi. Piitä seostettaessa esimerkiksi alumiinilla, syntyy materiaaliin aukkoja, joita voidaan käsitellä ylimääräisenä positiivisena varauksena. Positiivisen varauksen omaavaa materiaalia kutsutaan p-aineeksi. Pn-liitos muodostetaan asettamalla n-aine ja p-aine vierekkäin. Rakenne on hyvin stabiili, eikä siinä ole liikkuvia osia, minkä johdosta aurinkopaneelien tekninen käyttöikä on hyvin pitkä. (Käpylehto 2016, 58–59; Lehto ym. 2017 10–11.)



Kuvio 8. Aurinkokennon toimintaperiaate (Aurinkosähköteknologiat 2017.)

Kuviossa 8 on esitetty aurinkokennon toimintaperiaate. Lähellä aurinkokennon pn-liitosta sijaitsee tyhjennysalue, jossa n-aineen liitospuolelle muodostuu positiivinen varaus ja p-aineen liitospuolelle negatiivinen varaus. Positiivisen ja negatiivisen varauksen johdosta pn-liitoksen tyhjennysalueelle syntyy materiaalin sisäinen sähkökenttä. Fotonin saadessa puolijohteessa olevan elektronin liikkeelle muodostuu uusi elektroni-aukko-pari. Sisäinen sähkökenttä liikuttaa elektronin kohti positiivista varausta (n-aine) ja aukon kohti negatiivista varausta (p-aine). Sisäisen sähkökentän johdosta elektroni ja aukko eivät yhdisty, jolloin syntyy sähkövirta. Aurinkokennoihin lisätään kontakti, jonka avulla elektronit saadaan talteen ja näin ollen muodostettua sähkövirtaa. (Lehto ym. 2017. 12.)

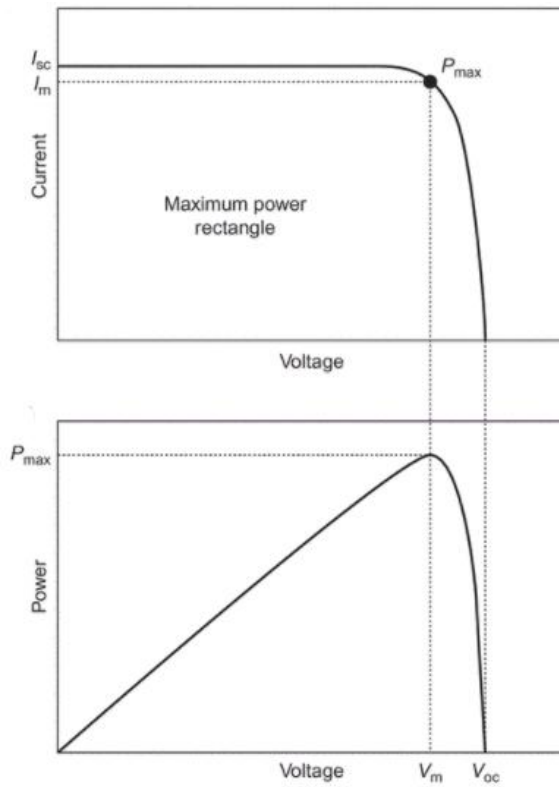
Tällä hetkellä tyypillinen teho edellä mainittua tekniikkaa käytävillä aurinkopaneeleilla verkkoon kytketyissä järjestelmissä on noin $200\text{--}330 W_p$. Paneelien teho ilmoitetaan paneelien huipputehon mukaan ”piikkiwatteina” (W_p), joka saavutetaan standarditestiolosuhteissa (engl. Standard Test Conditions, lyhenne STC). Käytetyt standarditestiolosuhteet ovat seuraavat:

- Säteily määrä on $1000 \frac{W}{m^2}$, joka vastaa kohtisuoraa auringon säteilyä maan pinnalle hyvissä olosuhteissa.

- Paneelin kennojen lämpötila on +25 °C, joka vastaa noin -5 °C...+5 °C ympäristölämpötilaa, koska kennot lämpenevät $1000 \frac{W}{m^2}$ säteilyssä.
- Ilmakehän paksuus on AM 1,5. Tällä tarkoitetaan, että auringon säteilyn spektri vastaa spektriä, joka syntyy, kun säteily kulkee ilmakehässä matkan, joka vastaa 1,5 kertaa ilmakehän paksuutta.

Käytännössä olosuhteet vastaavat vain hyvin harvoin standarditestiolosuhteita. Suomessa sen kaltaiset olosuhteet voisivat esiintyä kirkkaana ja kylmänä kevät- tai syyspäivänä. (Erat ym. 2016, 137–139.)

Kuviossa 9 on esitetty aurinkopaneelin ominaiskäyrä. Ominaiskäyrä tai virtajännitekäyrä kuvaa aurinkopaneelien käyttäytymistä. Sen perusteella voidaan selvittää, millä virran ja jännitteen suhteella paneeli tuottaa suurimman tehon Ohmin lain mukaisesti ($P = U * I$). Ominaiskäyrään liittyviä pisteitä ovat tyhjäkäyntijännite V_{OC} , oikosulkuvirta I_{SC} ja maksimitehopiste P_{max} . Maksimitehopisteestä käytetään yleensä lyhennettä MPP, joka tulee englannin kielen sanoista Maximum Power Point. (Kalogirou 2018, 8.)



Kuvio 9. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä (Kalogirou 2018, 8.)

Aurinkopaneeleille on ominaista, että säteilyn intensiteetin ja kennojen lämpötilan muuttuessa virran ja jännitteen suhde ei pysy samana. Paneelit tuottavat suurimman tehonsa kuitenkin aina vain yhdessä pisteessä, maksimitehopisteessä. Tästä syystä on tärkeää, että paneeleita kuormitetaan koko ajan optimaalisesti. (Käpylehto 2016, 62–63.)



Kuvio 10. Yksikiteinen ja monikiteinen aurinkopaneeli (Lemkem n.d, muokattu)

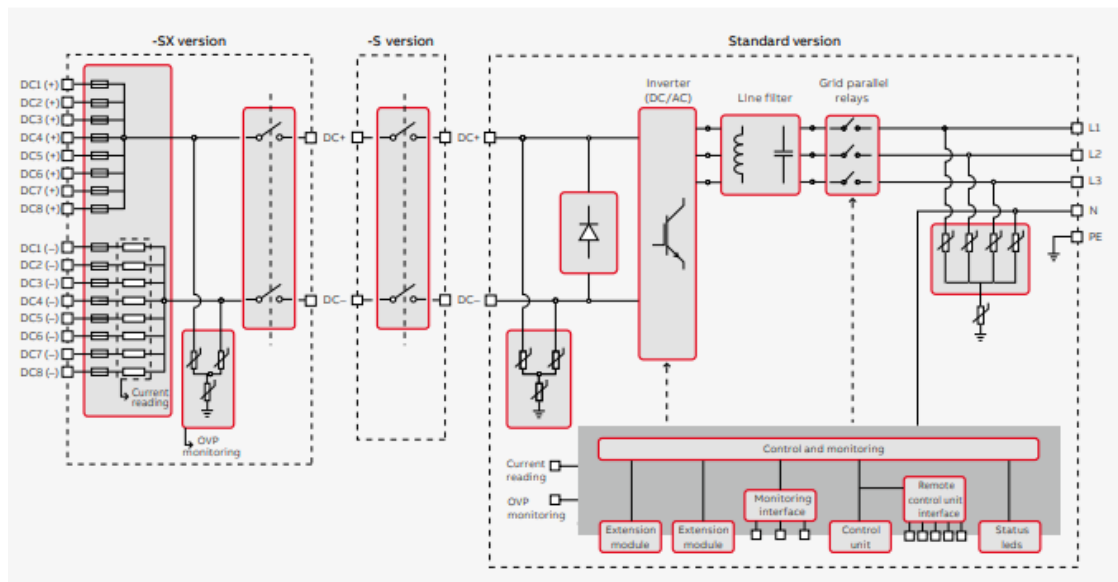
Kuviossa 10 on havainnollistettu yksi- ja monikiteisen aurinkopaneelin ulkonäköerot. Oikealla puolella oleva aurinkopaneeli on valmistettu yksikiteisestä piistä ja vasemmalla puolella oleva paneeli on valmistettu monikiteisestä piistä. Tässä työssä ei keskitytä muihin aurinkokennotyyppeihin tarkemmin. Voidaan kuitenkin todeta, että yksi- ja monikiteisten piikennotyyppeiden lisäksi on olemassa muitakin aurinkokennotekniikoita. Muista aurinkokennotekniikoista merkittävimpiä ovat tällä hetkellä ohutkalvokennot, joiden toiminta voi perustua esimerkiksi Kadmium-Telluuri eli CdTe-materiaaliyhdistelmään. Uusia aurinkokennotekniikoita kehitetään jatkuvasti. Yhdeksi nousevaksi aurinkokennotekniikaksi on luokiteltu väriaineherkistetyt kennot. Ne voivat olla erivärisiä, värittömiä tai erimuotoisia. Niiden ehdottomana etuna on halpa valmistus sekä käytettyjen aineiden myrkyttömyys. Niiden toiminta ei perustu perinteiseen pn-liitokseen, vaan niiden toiminta voidaan käsitellä keinotekoisena fotosynteesinä. (Erat ym. 2016, 137; Lehto ym. 2017, 16.)

4.4.3 Invertterit

Invertterit ovat aurinkopaneeleiden tavoin tärkeimpiä komponentteja aurinkosähköjärjestelmissä. Inverttereiden avulla aurinkopaneeleiden tuottama tasasähkö muutetaan vaihtosähköksi, joka vastaa kiinteistön sähköverkon sekä jakeluverkon vaatimuksia. Inverttereitä on olemassa yksi- ja kolmivaiheisia. Yksivaiheinen invertteri kytketään yhteen verkon kolmesta vaiheesta, jolloin aurinkosähköä voidaan hyödyntää vain kyseiseen vaiheeseen kytketyissä sähkölaitteissa. Yksivaiheisia inverttereitä käytetään vain pienissä, alle kolmen kW_p :n järjestelmissä, koska pienimpien markkinoilla olevien kolmivaiheisien inverttereiden teho on noin kolme kilowattia. Teollisuuskokoluokan aurinkovoimaloissa käytetään aina kolmivaiheisia inverttereitä. Kolmivaiheinen invertteri syöttää verkon kaikkia kolmea vaihetta, jolloin aurinkosähköjärjestelmästä saadaan suurin hyöty. Aurinkosähkön käyttö omaan tarpeeseen on kannattavampaa, kuin sähkön syöttäminen jakeluverkkoon. Tästä syystä sähkölaitteet tulee ryhmitellä vaiheittain siten, että kaikissa kolmessa vaiheessa on sähkölaitteita päällä silloin, kun aurinkosähköä tuotetaan. Jos esimerkiksi vain kahdessa vaiheessa on laitteita päällä, kun aurinkosähköä tuotetaan, siirtyy ilman kuormaa olevaan vaiheeseen syötetty sähkö verkkoon. (Erat ym. 2016, 144–145.)



Kuvio 11. ABB:n valmistama PRO-33.0-TL-OUTD invertteri (ABB n.d, 2.)



Kuvio 12. ABB:n valmistaman PRO-33.3-TL-OUTD invertterin lohkokaavio (ABB n.d, 3.)

Kuviossa 11 on kuva ABB:n valmistamasta 33 kW:n tehoisesta, suurten liikekiinteistöjen- ja teollisuusrakennusten katoille tai maan pinnalle rakennettuihin aurinkovoimaloihin sopivasta invertteristä. Kuviossa 12 on esitetty kyseisen invertterin lohkokaavio mistä selviää, mitä invertteri sisältää. (ABB n.d.)

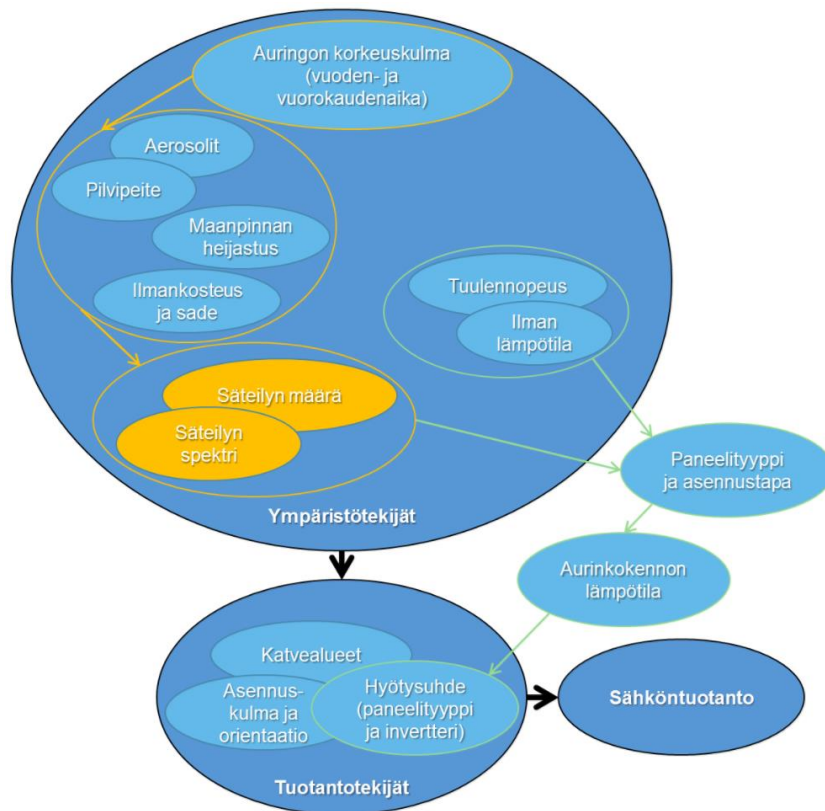
Inverttereitä valittaessa ja mitoitettaessa loivassa asennuskulmassa ja tasakatoille asennettuihin aurinkovoimaloihin, voidaan tyypillisesti DC/AC –kertoimena käyttää noin 1,1 arvoa. Käytännössä tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi paneelien tehon ollessa $70 kW_p$, inverttereiden vähimmäisteho on noin 64 kW. Tällöin järjestelmään voitaisiin valita esimerkiksi kaksi edellä esiteltyä 33 kW tehoista ABB:n invertteriä, joiden yhteisteho on 66 kW. Tämä käytäntö perustuu loivaan asennuskulmaan ja järjestelmän häviöihin, joiden johdosta paneelit eivät käytännössä saavuta nimellistä maksimitehoaan. Inverttereitä asennetaan yleensä enemmän kuin yksi ja oleellista on, että invertterit ovat keskenään samanlaisia. Tällöin varmistetaan käyttöönoton ja dokumentaation yksinkertaisuus ja mahdollisten vaihtolaitteiden yhteensopivuus. (Mäkinen 2017, 13–19.)

Inverttereillä on monia muitakin tehtäviä. Vaihtosuuntauksen jälkeen inverttereissä on tyypillisesti ylijännitesuoja sekä AC-kytkin. Olennainen toiminto verkkoon kytkettyjen järjestelmien inverttereissä on MPPT– säädin, joka tulee englanninkielen sanoista Maximum Power Point Tracker. MPPT– säätimiä voi olla kussakin invertterissä yksi tai useampi. MPPT– säädin säätää verkkoon syötetyn vaihtosähkötehon arvoa muuttuvan, aurinkopaneelien tuottaman tasasähkötehon arvon mukaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että MPPT– säädin kuormittaa aurinkopaneeliketjuja siten, että niiden tehontuotto pysyy jatkuvasti optimiarvossa vallitsevien olosuhteiden (lämpötila, auringon säteilyn määrä) mukaan. Inverttereihin, joissa on esimerkiksi kaksi MPPT– säädintä, voidaan itään- ja länteen suunnatut paneelit kytkeä eri MPPT– säätimille, jolloin itään suunnattujen paneelien tuotto hyödynnetään aamuisin ja länteen suunnattujen paneelien tuotto hyödynnetään iltapäivisin. (Erat ym. 2016, 144; Mäkinen 2017, 11.)

5 Tuotantoon vaikuttavat tekijät

5.1 Yleisesti

Aurinkovoimalan tuotanto on riippuvainen useista ympäristötekijöistä, toisin kuin monet muut energiantuotantomuodot. Aurinkovoiman tuottajien on oleellista ymmärtää tuotantoon vaikuttavien tekijöiden merkitys koko aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren aikana. Aurinkovoiman tuotantoon vaikuttavia tekijöitä ovat ympäristötekijöiden lisäksi aurinkokennojen lämpötila, varjostukset ja järjestelmän suuntaus sekä kallistuskulma. Aurinkovoimalaa suunnitellessa nämä tekijät on huomioitava, koska niiden huomiotta jättäminen voi pienentää järjestelmän tuotantoa huomattavasti. Edellä mainituista tekijöistä ylivoimaisesti merkittävimmät tekijät ovat aurinkokennojen lämpötila ja varjostukset. Esimerkiksi pienikin varjostus heikentää perinteisen aurinkovoimalan vuosituotantoa merkittävästi. (Gevorkian 2012, 32–35; Lehto ym. 2017, 18.)



Kuvio 13. Aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavat tekijät (Böök 2016.)

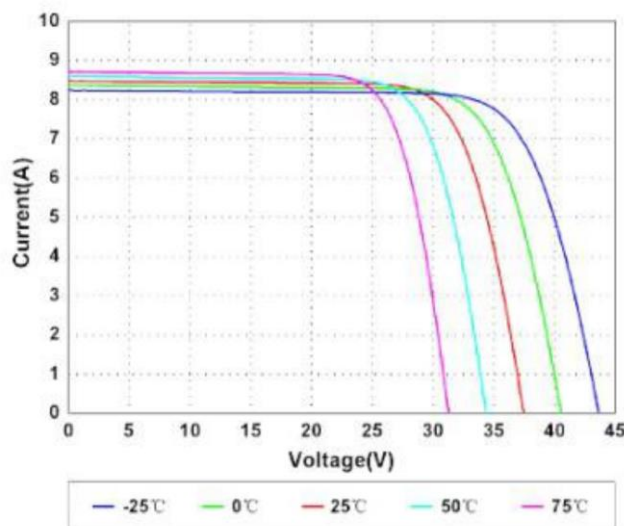
Kuviossa 13 on havainnollistettu aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Tuotantoon vaikuttavat tekijät voidaan jakaa ympäristö- ja tuotantotekijöihin. Käytännössä ympäristötekijät määrittävät, miten paljon aurinkovoimalalla on teoreettisesti mahdollista tuottaa sähköä. Ympäristötekijät koostuvat muun muassa vuoden- ja vuorokauden ajasta sekä auringon säteilymäärään vaikuttavista tekijöistä. Tuotantotekijät koostuvat muun muassa katvealueista eli varjostuksista, järjestelmän asennuskulmasta ja suuntauksesta sekä laitevalinnoista. Tuotantotekijöiden huomioiminen suunnitteluvaiheessa on tärkeää, jotta auringon säteilystä saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon. (Böök 2016.)

5.2 Aurinkokennojen lämpötila

Kuten aikaisemmin on todettu, aurinkokennot valmistetaan puolijohdemateriaaleista. Puolijohdemateriaaleille on ominaista, että niiden käyttäytyminen on riippuvainen lämpötilasta. Lämpötilan ollessa alhainen puolijohdemateriaalin resistanssi on

pieni, jolloin se vastustaa sähkövirran kulkua vähemmän. Lämpötilan ollessa korkea puolijohdemateriaalin resistanssi on suuri, jolloin se vastustaa sähkövirran kulkua enemmän. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että aurinkokenno toimii parhaiten aurinkoisissa, mutta kylmissä olosuhteissa. (Gevorkian 2012, 32.)

Aurinkopaneelivalmistajat ilmoittavat lämpötilan vaikutuksen paneelien tuotantoon. Lämpötilan vaikutus on ilmoitettu suhteessa standarditestiolosuhteisiin, eli kun aurinkokennon lämpötila on +25 °C. Yksikiteisillä piikenoilla lämpötilan vaikutus on yleensä noin 0,40 % yhtä celsiusastetta kohti. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi viiden celsiusasteen nousu aurinkokennon lämpötilassa pienentää sen tuotantoa kahdella prosentilla. Monikiteisten piikenojen lämpötilan vaikutus on samaa luokkaa tai vähän enemmän kuin yksikiteisillä piikenoilla, yleensä noin 0,42 % yhtä celsiusastetta kohti. (Lehto ym. 2017, 12.)



Kuvio 14. Lämpötilan vaikutus aurinkopaneelin ominaiskäyrään (AS-P60 250-275W Solar Module n.d)

Kuviossa 14 on havainnollistettu lämpötilan vaikutus erään monikidepaneelin ominaiskäyrään. Kuvioista nähdään, että aurinkokennojen lämpötilan noustessa paneelin

tuottama jännite pienenee ja lämpötilan laskiessa paneelien tuottama jännite nousee.

5.3 Sääolosuhteet ja sijainti

Sääolosuhteisiin ei voida vaikuttaa, mutta niiden merkitys järjestelmän tuotantoon on kuitenkin syytä ymmärtää. Sääolosuhteiden merkitys ymmärtäessä voidaan järjestelmän suunnittelussa tehdä ratkaisuja, joilla sääolosuhteiden negatiiviset vaikutukset pyritään minimoimaan ja positiiviset vaikutukset maksimoimaan. Sääolosuhteiden osalta aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavat lämpötila, tuuli ja pilvipeite. Ilmankosteuden ja ilmanpaineen merkitys järjestelmän tuotantoon on niin pieni, että niiden vaikutuksiin ei ole syytä keskittyä järjestelmää suunniteltaessa. Pilvipeite vaikuttaa järjestelmän tuotantoon paljon, mutta sen vaikutuksiin järjestelmän tuotannon osalta ei voida vaikuttaa suunnitteluvaiheessa. (Gevorkian 2012, 32–35.)

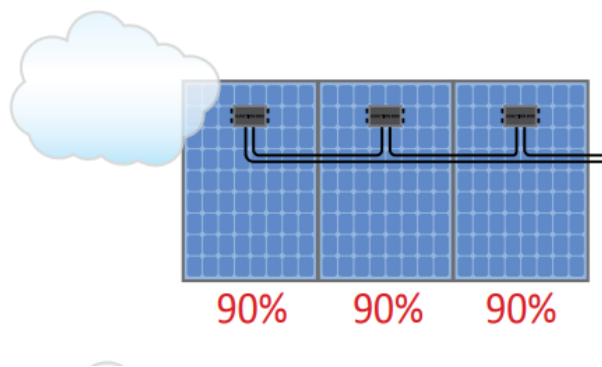
Sääolosuhteista olennaisimmat aurinkovoimalan suunnittelun kannalta ovat lämpötila sekä tuuli. Niitä kontrolloimalla voidaan vaikuttaa järjestelmän tuotantoon. Lämpötilan ja tuulen vaikutus järjestelmän tuotantoon johtuu edellä mainitusta aurinkokennojen lämpötilariippuvaisesta toiminnasta. Suomen olosuhteet sopivat aurinkokennojen toiminnalle hyvin, koska Suomessa lämpötilat ovat selvästi alhaisemmat kuin esimerkiksi Etelä-Euroopassa. Tuulta voidaan hyödyntää aurinkopaneelien jäähdyttämisessä. Tasakattoasennuksena toteutettujen aurinkosähköjärjestelmien telinevalintoja tehdessä on syytä ottaa huomioon, että telinerakenteet hyödyntävät tuulen jäähdytysominaisuutta. Telinerakenteen ollessa heikosti tuulettuva, voi paneelien energiantuotto pahimmillaan pudota jopa 30 prosentilla. (Lehto ym. 2017, 22.)

Aurinkovoimalan sijainti on olennainen tuotantoon vaikuttava tekijä. Maantieteellinen sijainti vaikuttaa auringon säteilyn kokonaismäärään ja auringon paistekulmaan. Esimerkiksi Suomessa kesällä valoista aikaa on paljon enemmän kuin Etelä-Euroopassa, jossa aurinko nousee myöhemmin ja laskee aikaisemmin kuin Suomessa. Toisaalta Suomessa aurinko paistaa matalammassa kulmassa, mikä vaikuttaa järjestelmien optimaaliseen asennuskulmaan. Maantieteellisten syiden lisäksi aurinkovoima-

lan tuotantoon voi vaikuttaa oleellisesti myös esimerkiksi lähellä sijaitsevat tehdas-alueet. Muutoin hyvin sijoitetun aurinkovoimalan tuotanto voi romahtaa, jos voimalan vieressä toimii esimerkiksi puunjalostamo, josta vapautuu ilmaan suuri määrä puupölyä. Pölyn laskeutuessa aurinkopaneelien pinnalle, vähenee niiden tuotanto merkittävästi. (Blazev 2012, 170.)

5.4 Varjostukset

Varjostuksilla on erittäin suuri vaikutus perinteisten aurinkovoimaloiden tuotantoon. Varjostusten vaikutukset johtuvat paneelien sisäisistä kytkennöistä sekä paneelien sarjaan kytkennästä paneeliketjuiksi. Pienikin varjostuma paneelissa heikentää koko paneelin tuotantoa. Oleellista perinteisissä aurinkovoimaloissa on, että jokainen sarjaan kytketty paneeli kykenee tuottamaan vain sen virran, minkä paneeliketjun heikoin paneeli tuottaa (ks. Kuvio 15). Pahimmassa tapauksessa koko paneeliketjun jännite putoaa siten, että järjestelmän säätö ei selviä tilanteessa ja koko tuotanto lakkaa kyseisessä paneeliketjussa. (Lehto ym. 2017, 20.)



Kuvio 15. Aurinkopaneelien toiminta varjostustilanteessa (SolarEdge commercial solutions for increased revenue & advanced asset management n.d, 6.)

Suurimmat pettymykset aurinkovoimaloiden tuotannossa johtuvat usein varjostusten aliarvioinnista. Varjostuksien osalta koko alue idästä länteen on tarkastettava perusteellisesti. Varjostuksia aiheuttavat esimerkiksi puut, korkeat rakennukset ja katolla

sijaitsevat rakenteet, kuten savunpoistoluukut. Varjostuksien osalta on syytä huomioida myös aurinkovoimaloiden pitkä elinikä ja mahdolliset maisemanmuutokset koko järjestelmän elinkaaren aikana. Järjestelmän elinkaaren aikana tapahtuvia maisemanmuutoksia voi olla esimerkiksi kasvillisuuden lisääntyminen tai korkeiden rakennusten rakentaminen voimalan läheisyyteen. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että paneelien etäisyys varjostavasta objektista tulisi olla kolme kertaa varjostavan objektin korkeuden pituinen. (Erat ym. 2016, 181–182; Design into Shade n.d.)

5.5 Lumen aiheuttamat varjostukset

Suomessa lunta ei puhdisteta aurinkopaneelien pinnoilta talvisin, vaikka lumi heikentää etenkin loivassa asennuskulmassa asennettujen aurinkopaneelien talviajan tuotantoa merkittävästi. Talvella valoista aikaa on kuitenkin hyvin vähän, joten paneelien pitäminen lumettomana joko puhdistamisen tai lämmitysjärjestelmän avulla ei ole kustannustehokasta. Lumen varjostavia vaikutuksia voitaisiin ehkäistä asentamalla paneelit korkeampaan kallistuskulmaan, jolloin lumi ei kinostu paneelipinnoille niin helposti. Kattoasennuksena ja loivassa asennuskulmassa asennettujen paneelien asennuksessa ei ole kustannusmielessä järkevää ryhtyä toimenpiteisiin lumen varjostavien vaikutusten suhteen. Lumen vaikutus on kuitenkin hyvä huomioida voimalan vuotuista tuotantoa arvioitaessa. Lumi voi heikentää voimaloiden vuotuista tuotantoa jopa 3–7 % lumen määrästä ja sijainnista riippuen. (Freeman & Ryberg 2017, 11–12.)

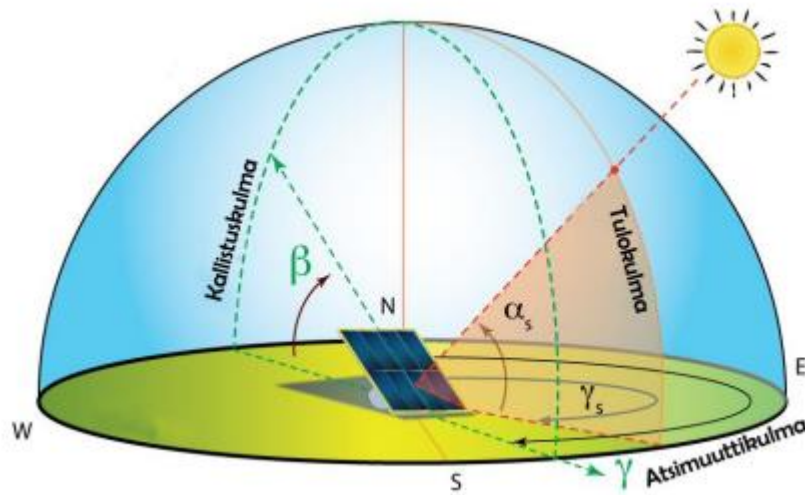
5.6 Järjestelmän suuntaus ja paneelien kallistuskulma

Järjestelmän suuntauksella tarkoitetaan sitä, mihin ilmansuuntaan aurinkopaneelit on asennettu osoittamaan. Aurinkovoimalan suuntaus ilmoitetaan atsimuuttikulmalla, joka ilmoittaa järjestelmän suuntauksen poikkeaman etelästä asteina. Atsimuuttikulman ollessa 0° järjestelmä on siis suunnattu kohti etelää. Järjestelmä on suunnattu itään päin, kun atsimuuttikulma on -90° ja länteen päin, kun atsimuuttikulma on +90°. Paneelien kallistuskulmalla tarkoitetaan sitä, missä kulmassa aurinkopaneelit on asennettu suhteessa horisonttiin. Kallistuskulma ilmoitetaan astelu-

kuina kuten suuntauskulmakin. Kallistuskulman ollessa 0° paneelit on asennettu vaakatasoon ja kallistuskulman ollessa 90° paneelit on asennettu pystyasentoon esimerkiksi rakennuksen seinää vasten. (Lehto ym. 2017, 19.)

Järjestelmän suuntaus ja paneelien kallistuskulma vaikuttavat järjestelmän kokonaistuotantoon ja tuotannon vuosijakaumaan. Suomen olosuhteissa aurinkovoimala on teoreettisesti tarkasteltuna optimaalisesti asennettu, kun se on suunnattu kohti etelää (suuntakulma 0°) ja paneelien kallistuskulma on noin 40° – 45° . Aurinkovoimalan tuotto pienenee kuitenkin hitaasti suuntauksen muuttuessa. Esimerkiksi järjestelmän suuntauksen ollessa kaakkoon tai lounaaseen (suuntakulma -45° tai $+45^\circ$) on järjestelmän vuotuinen tuotto noin 8 prosenttia pienempi etelään suunnattuun järjestelmään verrattuna. Kattoasennuksena toteutetut aurinkovoimalat ovat täten viisasta ja kustannustehokkainta asentaa katon lappeen mukaisesti, vaikka suuntaus poikkeaisikin etelästä. (Erat ym. 2016, 180–181.)

Nykyisellä hintatasolla optimikulmana voidaan pitää kulmaa, jolla voidaan tuottaa mahdollisimman paljon sähköä mahdollisimman edullisesti. Tyypillisesti tasakattoasennuksena toteutetut järjestelmät asennetaan Suomessa 15° – 20° kulmaan. Teoreettiseen optimikulmaan verrattuna matalampi kulma on kustannustehokkaampi vaihtoehto. Järjestelmän asentaminen on halvempaa ja yksinkertaisempaa, koska järjestelmän tuulikuorma on pienempi kuin suuremmalla kulmalla. Ympäristön varjostava vaikutus on pienempi kuin optimikulmalla, mikä usein tasoittaa tuotannon erot jyrkemmässä kulmassa olevaan systeemiin. Lisäksi katolle voidaan sijoittaa enemmän paneeleita, koska paneelit voidaan asentaa tiiviimpiin riveihin. (Erat ym. 2016, 181.)



Kuvio 16. Aurinkopaneelin kallistus- ja atsimuuttikulma (Tyni 2016, 20.)

Kuviossa 16 on havainnollistettu aurinkopaneelin kallistus- ja atsimuuttikulma. Tasakatoille asennetuissa aurinkovoimaloissa paneelien kallistuskulma vaikuttaa merkittävästi paneelirivien väliseen etäisyyteen. Paneelirivien välinen minimietäisyys on riippuvainen paneelien kallistuskulmasta, paneelien korkeudesta ja auringon tulokulmasta. Paneelirivien välinen minimietäisyys voidaan laskea kaavalla 1.

$$x = l * \frac{\sin \beta}{\tan \alpha_s} + \cos \beta \quad (1)$$

missä x = paneelirivien välinen etäisyys (etureunasta etureunaan)

l = paneelin korkeus

β = paneelien kallistuskulma

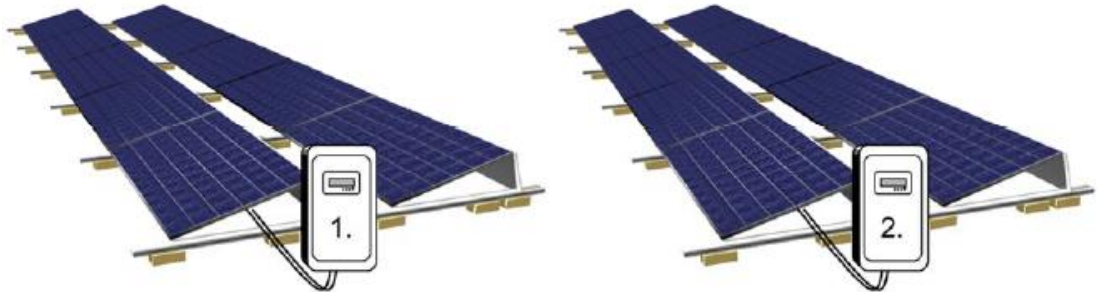
α_s = auringon tulokulma

Auringon tulokulman arvo riippuu voimalan maantieteellisestä sijainnista ja vuodenaikasta. (Tyni 2016, 20.)

6 Aurinkovoimalan suunnittelu

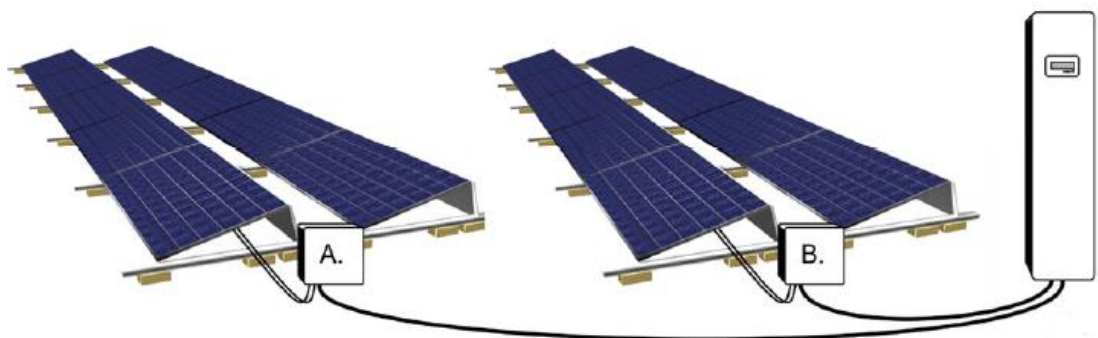
Aurinkovoimalat toteutetaan tyypillisesti joko hajautetulla tai keskitetyllä topologialla. Edellä mainittujen toteutustapojen erona on se, että hajautetulla topologialla

toteutetussa aurinkovoimalassa aurinkopaneeliketjut kytketään suoraan inverttereihin, joiden teho on mitoituksen mukainen (ks. Kuvio 17).



Kuvio 17. Hajautetulla topologialla toteutettu aurinkovoimala (Mäkinen 2017, 7, muokattu)

Keskitetyllä topologialla toteutetussa aurinkovoimalassa aurinkopaneeliketjut puolestaan kytketään kuvion 18 mukaisesti ensin DC-kytkentäkoteloihin ja kytkentäkoteiloilta edelleen poikkipinnaltaan suuremmilla DC-kaapeleilla keskusinvertteriin.



Kuvio 18. Keskitetyllä topologialla toteutettu aurinkovoimala (Mäkinen 2017, 8, muokattu)

Tarkkaa tehorajaa, milloin tulisi käyttää hajautettua tai keskitettyä topologiaa ei ole. Keskitetyllä topologialla toteutetaan yleensä suuret, yli $1 MW_p$ tehoiset aurinkovoimalat ja hajautetulla topologialla tätä pienemmät voimalat. Hajautetussa topologiassa voidaan myös hyödyntää erillisiä DC-kytkentäkotelaita, jolloin kytkentäkotelot asennetaan katolle aurinkopaneelikenttien läheisyyteen. Tätä toimintatapaa käytettäessä saavutetaan säästöjä, koska tällöin DC-kaapeloiden määrä vähenee. (Mäkinen 2017, 7–8)

Liike- ja teollisuusrakennusten katoille on mahdollista asentaa isoja aurinkovoimalaita. Kattoasennuksena toteutettuja aurinkovoimalaita suunnitellessa on syytä huomioida, että vaikka vapaata kattopintaa olisi laskennallisesti paljon, voivat talotekniset rakenteet pienentää järjestelmälle soveltuvaa pinta-alaa. Rakenteet täytyy huomioida ja pyrkiä sijoittamaan järjestelmä niin, että hyödynnettävissä oleva pinta-ala tulee käytettyä optimaalisesti. Kattoasennuksessa on aina selvitettävä katon kantavuus sekä vesikatteen ikä. Katon tulee kestää talven lumikuorman ja aurinkopaneelien aiheuttaman lisäkuorman yhteiskuorma. Vesikatteen tulee olla uusi tai juuri uusittu, jotta vältetään järjestelmän purkamiselta mahdollisten kattoremonttien johdosta. (Mäkinen 2017, 16.)

6.1 Aurinkovoimalaa koskevat vaatimukset

Kaikenkokoisten aurinkovoimaloiden toteutuksissa on huolehdittava sähköasennuksia koskevien lakien, asetusten, määräyksien ja ohjeiden noudattamisesta. Eniten järjestelmien asennuksiin vaikuttava laki on sähköturvallisuuslaki (1135/2016). Sähköturvallisuuslaki vaatii asennukset tehtäviksi turvallisesti. Asennukset voidaan suorittaa turvallisesti noudattamalla sähkötekniisiä standardeja, jotka on esitetty luvussa 6.2. Tuotantolaitos voidaan liittää verkkoon, kun se täyttää sille asetetut tekniset vaatimukset. Vaatimuksilla varmistetaan sähkön laadun pysyminen hyvänä sekä sähkön käyttäjien ja sähköverkon parissa työskentelevien turvallisuus. Verkkoon ei saada kuitenkaan siirtää sähköä, ellei sähkölle ole ostajaa. Tällä hetkellä verkkoyhtiöt eivät ole lain mukaan velvollisia ostamaan pientuottajien ylijäämäsähköä, joskin useimmat niin tekevät. (Lehto ym. 2017, 30–37.)

Oleellinen aurinkovoimalan tehoraja tuotetun sähkön verotuksen kannalta on 100 kVA. Sähkön pientuottaja vapautuu sähköverovelvollisuudesta, mikäli sähkö tuotetaan enintään 100 kVA tehoisella laitteistolla tai yli 100 kVA tehoisella laitteistolla, jonka vuotuinen sähköntuotanto on enintään 800 MWh. Mikäli aurinkovoimalan koko on yli 100 kVA, mutta tuotanto alle 800 MWh, on pientuottajan rekisteröidyttävä Tullin rekisteriin sähköverovelvolliseksi. Tällöin pientuottaja antaa vuosittain veroilmoituksen tuottamastaan sähköstä, mutta veroja ei tule maksettavaksi. Mikäli vuotuinen tuotanto on yli 800 MWh, on pientuottaja normaalisti sähköverovelvollinen ja joutuu antamaan veroilmoitukset kuukausittain sekä maksamaan verot omissa käytössä hyödynnetystä sähköstä. Sähköverkkoon myydyin sähkön osalta sähköveroja ei maksa tuottaja, vaan verkkoyhtiö laskuttaa sähköveron siltä, kuka lopulta kyseisen sähkön käyttää. (Lehto ym. 2017, 36.)

6.2 Sähkötekniset standardit

Oleellisimpia standardeja ovat SFS 600-1 –käsikirjan SFS 6000 –standardit pienjänniteasennuksiin ja SFS 607 –käsikirjan standardit aurinkosähköjärjestelmiin. SFS 600-1 –käsikirjan standardien olennaisimpana sisältönä ovat pienjänniteasennuksien turvallisuuteen liittyvät vaatimukset, kuten suojaukset, johdinmitoitukset, järjestelmän rakenne ja laitevalinnat. SFS 607 –käsikirjan standardit sisältävät yksityiskohtaisemmat vaatimukset aurinkosähköjärjestelmän suunnitteluun, toteutukseen, käyttöönottoon, käyttöön ja ylläpitoon. SFS 607 –käsikirjan olennaisimmat standardit ovat:

- SFS 6000-7-712, Pienjänniteasennukset, Valosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät
- SFS-EN 62446, Sähköverkkoon kytketyt PV-järjestelmät
- SFS-EN 61724, Valosähköisen järjestelmän suorituskyvyn valvonta
- SFS-EN 50438, Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille

Suomessa voidaan hyödyntää myös Saksassa käytettyä VDE-AR-N-4105 –normia ja aurinkosähköjärjestelmä voidaan liittää sähköverkkoon, jos se täyttää kyseisen normin vaatimukset. Suomessa verkkoon liitettävien aurinkosähköjärjestelmien invertteerien tulee siis täyttää joko standardin SFS-EN 50438 tai VDE-AR-N-4105 –normin vaatimukset. (Lehto ym. 2017, 30–31.)

6.3 Mitoitusperiaate

Aurinkovoimalaa mitoitettaessa olennaista on energiantuoton kannalta kustannustehokkain ratkaisu eli se, että aurinkovoimalalla tuotettu sähkö voidaan käyttää mahdollisimman tehokkaasti itse. Ennen varsinaista mitoitusta selvitetään asennuspaikan olosuhteet. Olosuhteiden avulla eri kokoisten järjestelmien tuotantoa voidaan arvioida ja verrata kulutustietoihin. Kohteen sähkön kulutustiedot ja sähkön kulutuksen jakautuminen toimivat mitoituksen ensisijaisena perusteena. Mitoitusperusteina voidaan käyttää esimerkiksi pohjakulutukseen, keskimääräiseen kuukausikulutukseen tai energiaomavaraisuuteen perustuvaa mitoitusta. Jo olemassa olevien rakennusten kulutustiedot saadaan yleensä helposti ja tarkasti verkkoyhtiöltä. Uudisrakennusten osalta kulutusta voidaan arvioida vertaamalla kohdetta vastaavanlaiseen toiseen rakennukseen, jolloin mitoitus voidaan tehdä kulutuksen arvion pohjalta. Muita mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi käytettävissä oleva pinta-ala ja budjetti. Käytettävissä oleva pinta-ala voi etenkin kattoasennuksena toteutetuissa järjestelmissä toimia rajoittavana tekijänä järjestelmän koon suhteen. (Lehto ym. 2017, 70–76.)

6.4 Mitoitustyökalut

Aurinkovoiman yleistyessä tarve voimaloiden tuotannon tarkkaan arviointiin on kasvanut. Tämän tarpeen johdosta on kehitetty useita simulointiohjelmistoja, jotka perustuvat matemaattisiin, empiirisiin ja elektronisiin malleihin. Oleellista mitoitustyökaluja hyödynnettäessä on kuitenkin muistaa, että mitoitustyökalujen antamat arvot perustuvat aina keskimääräisiin tietoihin, joten täysin tarkkoja tuloksia niillä ei voida saavuttaa. Tulosten tarkkuus riippuu pääasiassa lähtötietojen määrästä. Olennaisin lähtötieto on järjestelmän sijainti, jonka perusteella voidaan selvittää auringon säteilyn määrä ja säteilyn jakautuminen vuositasolla sekä mahdollisesti myös lämpötilan ja tuulen vaikutukset järjestelmän tuotantoon. Muita oleellisia lähtötietoja ovat esimerkiksi paneelin ominaisuudet kuten hyötysuhde, paneeleiden asennuskulma ja järjestelmän suuntaus. Mitoitusohjelmistojen tulokset ovat riittävän tarkkoja takaisinmaksuaikojen laskemiseen. Hyödyllisiä internet –pohjaisia laskentatyökaluja ovat esimerkiksi Euroopan komission ylläpitämä PVGIS-aurinkoenergian laskentaohjelma,

Finsolar-kannattavuuslaskuri ja National Solar Radiation Databasen ylläpitämä PVWatts-laskentaohjelma. (Kalogirou 2018, 683; Lehto ym. 2017, 70–72.)

6.5 Tuotannon arviointi

Aurinkovoimalan tuotantoa arvioidaan joko edellä mainittujen laskentatyökalujen avulla tai perinteisin keinoin esimerkiksi Excelin avulla. Yksinkertaisin perinteinen keino arvioida aurinkovoimalan tuotantoa on niin sanottu yhden pisteen malli, single-point efficiency model. Kyseistä mallia käytettäessä huomioidaan vain paneelipinta-alalle saapuva säteily määrä, paneelien pinta-ala ja paneelien hyötysuhde standarditestiolosuhteissa. Yhden pisteen mallin mukainen tuotannon arvio voidaan laskea kaavalla 2.

$$E_{PV} = G * A * \eta \quad (2)$$

missä G = paneelipinta-alalle saapuva säteily määrä

A = paneelien pinta-ala

η = paneelien hyötysuhde

Tuloksena saadaan käytännössä järjestelmän teoreettinen tuotanto, koska kyseinen kaava ei huomioi järjestelmän häviöitä. Tarvittaessa yhden pisteen malliin voidaan lisätä vielä toimintakerroin, joka kuvaa järjestelmän häviöitä. Järjestelmän toimintakerroimen arvo on tyypillisesti 0,75–0,9 järjestelmän olosuhteista riippuen. (Kalogirou 2018, 683.)

7 Aurinkovoimalan tuotannon maksimointi

7.1 Järjestelmän optimaalinen asennus

Tärkein seikka aurinkovoimalan optimaalisessa asennuksessa on paneelien ryhmittely. Paneelien ryhmittelyllä tarkoitetaan sitä, miten paneelit sijoitetaan ja kytketään. Optimaalisen ryhmittelyn tarkoituksena on ehkäistä tilanteita, joissa esimerkiksi eri vuorokaudenaikojen erilaisista varjostuksista tai paneeliketjujen epäsymmetriasta johtuen järjestelmän tuotanto heikkenee. Suunnittelijan on tarkasteltava paneelien ryhmittelyä ennen lopullista mitoitus. Ryhmittelyyn vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa paneelien kokonaismäärä, suuntaukset, varjostukset, paneelityypit

ja inverttereiden ominaisuudet. Inverttereiden ominaisuuksista ryhmittelyyn vaikuttavat etenkin MPPT –säätimien ja tulojen lukumäärät. (Lehto ym. 2017, 73.)

Vähimmäisvaatimus on, että kaikilla paneeliketjuilla, jotka ovat eri olosuhteissa on omat MPPT –säätimensä. MPPT –säätimien lukumäärää kannattaa yleensä kasvattaa käyttämällä useampaa invertteriä, koska useamman laitteen käyttäminen ei vaikuta merkittävästi kustannuksiin. Yhdelle säätimelle on yleensä useampi tulo, eli invertterin tulojen määrä ei ole sama kuin säätimien määrä. Tämä tarkoittaa sitä, että paneeliketjuja kytketään rinnakkain yhteen säätimeen. Rinnakkain kytketyissä paneeliketjuissa on huomioitava, että kaapelointi on yhtä pitkä ja tehty samanlaisilla kaapeleilla, paneelien tyypit sekä määrät ovat samat, rinnakkaisille ketjuille ei muodostu varjostumia ja rinnakkaiset ketjut ovat suunnattu samaan suuntaan ja asennettu samaan kallistuskulmaan. (Lehto ym. 2017, 73–74.)

Paneelien kytkennän osalta paneeliketjuissa tulee olla sama määrä paneeleita. Paneelien määrään paneeliketjuissa vaikuttaa paneelien- ja inverttereiden tekniset ominaisuudet. Paneelien maksimimäärä yhdessä paneeliketjussa voidaan laskea kaavalla 3.

$$\frac{V_{max,invertteri}}{V_{OC,paneeli} + (V_{OC,lämpötilakerroin} * T_{min})} \quad (3)$$

missä $V_{max,invertteri}$ = invertterin maksimitulojännite

$V_{OC,paneeli}$ = paneelien avoimen piirin jännite

$V_{OC,lämpötilakerroin}$ = avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin

T_{min} = minimilämpötila

Avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimella tarkoitetaan lämpötilan vaikutusta paneelin maksimijännitteeseen. Jännite laskee lämpötilan noustessa ja nousee lämpötilan laskiessa. Esimerkilaskussa käytetään aikaisemmin esiteltyä ABB PRO-33.0-TL-OUTD invertteriä ja Trinasolarin TSM-PD05.08S 265 W_p monikidepaneelia. Kyseisen invertterin maksimitulojännite on 1100 V ja kyseisen paneelin avoimen piirin jännite on 38,3 V. Kyseisen paneelin avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin on -0,32

$\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$ ja minimilämpötilana esimerkkilaskussa käytetään arvoa -40°C , koska se on kyseisen paneelin minimikäyttölämpötila. Tällöin kyseisiä komponentteja käytettäessä maksimimäärä paneeleita yhdessä paneeliketjussa on

$$\frac{1100 \text{ V}}{38,3 \text{ V} + \left[-0,32 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} * (-40^{\circ}\text{C})\right]} = 21,52 \text{ paneelia} \approx 21 \text{ paneelia}$$

Jokaiseen paneeliketjuun voidaan kytkeä sarjaan 21 paneelia. Paneelien määrä paneeliketjuissa kannattaa pyrkiä valitsemaan aina maksimimäärän mukaan. (ABB n.d.; TrinaSolar n.d.)

7.2 Älykkäät aurinkovoimalat

Markkinoille on saapunut viime vuosina älykkäät aurinkosähköjärjestelmät. Käytännössä älykkäät järjestelmät toimivat siten, että jokaista paneelia ohjataan omalla MPPT–säätimellä erikseen asennettavan tai valmiiksi paneeliin asennetun tehon optimoijan avulla. Perinteisissä järjestelmissä MPPT–säätö tapahtuu invertterin kautta yhden tai useamman paneeliketjun mukaan. Tällä voidaan saavuttaa suurempia tuottoja etenkin paikoissa, joissa varjostuksia ei voida täysin välttää. Älykkäitä aurinkosähköjärjestelmiä toimittava SolarEdge lupaa järjestelmille 2–10 % paremman energiantuotannon perinteiseen järjestelmään verrattuna. (SolarEdge commercial solutions for increased revenue & advanced asset management n.d, 2–6.) Älykkäiden järjestelmien kustannustehokkuutta ja muita etuja on syytä tutkia tarkemmin, koska älykkäät järjestelmät ovat hinnaltaan selvästi kalliimpia, kuin perinteiset järjestelmät.

Älykkäällä aurinkovoimalalla on muitakin etuja, kuin pelkkä tuotannon kasvaminen. Näitä ovat esimerkiksi asennuksen ja suunnittelun joustavuus, pienemmät kaapelointikustannukset, paneelikohtainen tuotannon seuranta ja turvallisuuden merkittävä parantuminen. Asennus ja suunnittelu helpottuvat älykkään järjestelmän joustavuuden myötä, koska varjostavia rakenteita ei tarvitse huomioida niin tarkasti kuin perinteisissä järjestelmissä ja samassa paneeliketjussa olevia paneeleita voidaan asentaa eri kulmaan ja eri ilmansuuntiin. Tarvittu kaapelimäärä pienenee merkittävästi, koska älykkäissä järjestelmissä voidaan asentaa enemmän paneeleita yhteen paneeliketjuun kuin perinteisessä järjestelmässä. (SolarEdge commercial solutions for increased revenue & advanced asset management n.d, 2–11.)

Paneelikohtainen tuotannon seuranta ja järjestelmän parantunut turvallisuus osoittaa arvonsa vasta ongelmien sattuessa. Perinteisissä järjestelmissä tuotantoa voidaan tyypillisesti seurata invertterikohtaisesti. Inverttereihin kytketään useita paneeliketjuja, joten vikatilanteessa vian paikantaminen on haastavaa. Paneelikohtaisella tuotannon seurauksella vian aiheuttaja saadaan nopeasti selville ilman, että järjestelmän luona tarvitsee edes käydä. Tällöin huoltokustannukset pienenevät merkittävästi. Turvallisuusasioihin täytyy aina suhtautua vakavasti. Perinteisiä aurinkovoimaloita voidaan pitää turvallisina, eikä niistä ole aiheutunut merkittäviä turvallisuusongelmia Suomessa. Perinteisten aurinkovoimaloiden kriittisin turvallisuuteen liittyvä ongelma on tasajännitepuolen jännitteellisyys aina, kun aurinko paistaa. Vaikka järjestelmän vaihtosähköpuoli tehdään jännitteettömäksi turvakytkimen avulla, aurinkopaneeliketjut tuottavat katolla suurimmillaan noin 1000 Voltin tasajännitteen. Älykkäissä aurinkovoimaloissa on toiminto, jonka avulla jokaisen aurinkopaneelin tuottama jännite pienenee yhteen Volttiin aina, kun invertteri ei ole päällä. (SolarEdge commercial solutions for increased revenue & advanced asset management n.d, 2–11.)

7.3 Käytännön esimerkki älykkään ja perinteisen aurinkovoimalan eroista varjostustilanteessa

Älykkään- ja perinteisen aurinkovoimalan rakenne on sama lukuun ottamatta älykkään voimalan paneeleihin asennettuja tehon optimoijia. Vertaillen kyseisten voimaloiden eroavaisuuksia voidaan käyttää esimerkkinä yhtä 21 samanlaisesta paneelistä koostuvaa paneeliketjua, josta yhteen paneeliin osuu varjo. Esimerkkipaneelina

käytetään TrinaSolarin TSM-PD05.08S 265 W_p monikidepaneeleita, jonka tekniset ominaisuudet on esitetty kuviossa 19.

Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	265
Power Output Tolerance- P_{MAX} (W)	
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	30.8
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	8.61
Open Circuit Voltage- V_{oc} (V)	38.3
Short Circuit Current- I_{sc} (A)	9.10
Module Efficiency η_p (%)	16.2

Kuvio 19. Trinasolar TSM-PD05.08S 265 Wp paneelin tekniset ominaisuudet (TrinaSolar n.d.)

Perinteisen voimalan invertteri käsittelee paneeliketjun ikään kuin yhtenä isona paneelina, jonka tehon optimointi tapahtuu invertterin MPPT –säätimen avulla. Paneelien sarjaan kytkennästä johtuen jokaisen paneelin läpi kulkee aina sama virta, mutta jännite kasvaa sen mukaan, kuinka monta paneelia paneeliketjuun on asennettu (Häberlin 2012, 140). Jos paneeleita on kytketty esimerkiksi 21 kappaletta sarjaan, voidaan paneeliketjun tuottama teho laskea kaavalla 4.

$$P = (V_{MPP} * \text{paneelien lukumäärä}) * I_{MPP} \quad (4)$$

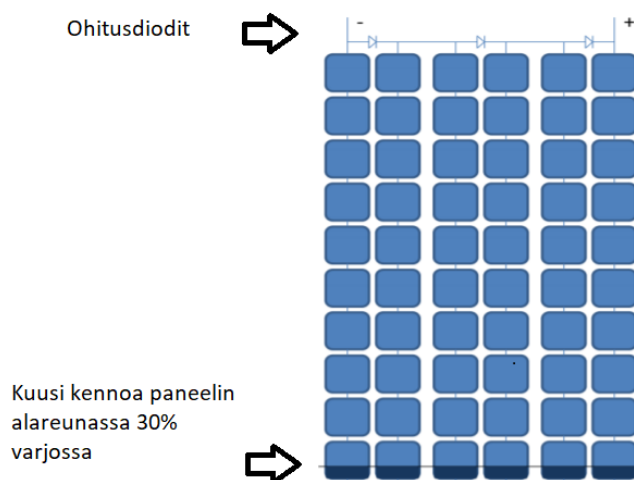
missä V_{MPP} = paneelin tuottama jännite maksimitehopisteessä

I_{MPP} = paneelin tuottama virta maksimitehopisteessä

Jolloin edellä mainittujen paneelien tuottama teho standarditestiolosuhteissa olisi

$$P = (30,8V * 21) * 8,61A = 5569 W$$

Oletetaan että varjo osuu yhteen paneeliketjun paneeleista siten, että se peittää paneelin reunalla olevista kuudesta kennosta 30 prosenttia kuvion 20 mukaisesti. Nykyisin paneeleihin on tyypillisesti asennettu ohitusdiodit, joilla on suuri merkitys paneelien tuotantoon tilanteissa, joissa paneelit ovat osittain varjostuneet. Esimerkkilaskuissa havainnollistetaan ohitusdioiden merkitys laskemalla yhden kennon varjostumisen vaikutus koko paneeliketjun tuotantoon, jos paneeleissa ei ole ohitusdiodeja ja jos paneeleissa on ohitusdiodeja kolme kappaletta. Oletetaan, että kun kennosta 30 prosenttia on varjossa, aiheuttaa se kennon tuottamaan virtaan 30 prosentin laskun.



Kuvio 20. Paneelin varjostumistilanne (SolarEdge n.d, 3 muokattu)

Jos paneelissa ei ole ohitusdiodeja, pienentävät varjostuneet kennot koko paneelin virtaa 30 prosentilla ja siten koko paneeliketjun virtaa 30 prosentilla.

$$P = (30,8V * 21) * (8,61A * 0,7) = 3898 W$$

Jos paneelissa on kolme ohitusdiodia, varjostuneet kennot eivät vaikuta koko paneeliin, vaan vain niihin kennoihin, jotka ovat kytketty samaan ohitusdiodiin. Varjostustilanteessa ohitusdiodi aktivoituu ja "ohittaa" kennosarjan, jossa varjostunut kenno si-

jaitsee. Tällöin paneelin tuottama virta ei laske, mutta kyseisessä kennosarjassa olevat kennot eivät nosta paneelin tuottamaa jännitettä. Varjo osuu kuitenkin paneelin reunaan siten, että jokaisen ohitusdiodin kennosarjassa on varjostuneita kennoja. Tällöin kaikki ohitusdiodit aktivoituvat ja koko paneeli ”ohitetaan”, jolloin kyseinen paneeli ei kasvata paneeliketjun jännitettä ollenkaan.

$$P = (30,8V * 20) * 8,61A = 5304 W$$

Jos kyseessä on älykäs järjestelmä, on varjostuneeseen paneelin asennettu tehon optimoija. Tehon optimoijan ansiosta myös varjostunut paneeli saadaan valjastettua energian tuotantoon. Esimerkiksi Tigo Energy:n valmistamien optimoijien ominaisuuksiin kuuluu, että optimoija ei ole pakko asentaa paneeliketjun kaikkiin paneeleihin, vaan niihin, jotka sijaitsevat varjostavan objektin läheisyydessä. Varjostuneen paneelin tuottama teho optimoidaan siten, että varjostuneen paneelin virta ei laske alemmaksi kuin varjostamattomien paneelien. (Design into Shade n.d.)

$$P = (30,8V * 20) * 8,61A + (30,8V * 8,61A * 0,7) = 5489 W$$

Taulukossa 1 on koottu esimerkkilaskelman tulokset taulukkomuotoon. Tuloksista ilmenee, että tehon optimoijaa varjostuneessa paneelilla käyttämällä saavutetaan 3,4 prosentin kasvu paneeliketjun tuottamassa tehossa (98,6 % – 95,2 % = 3,4 %). Tehon optimoijilla ei saavuteta merkittäviä parannuksia yksittäisen paneeliketjun tuotannossa.

Taulukko 1. Esimerkkilaskelman tulokset

Järjestelmätyyppi	Teho	Prosenttia optimaalisesta tilanteesta
Standarditestiolosuhteet	5569 W	100 %
Perinteinen paneeliketju ilman ohitusdiodeja	3898 W	70 %
Perinteinen paneeliketju kolla ohitusdiodilla	5304 W	95,2 %
Älykäs paneeliketju	5489 W	98,6 %

8 Teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu

Opinnäytetyön tavoitteena oli, että työssä analysoidaan kymmenen aurinkovoimalan tuotantoja. Kymmenestä aurinkovoimalasta valittaisiin kolme sopivaa kohdetta, joille tehtäisiin kattavampi analyysi. Säteilytietojen puutteellisuudesta johtuen todellisiin säteilymääriin perustuvat analyysit voitiin toteuttaa vain kahdelle voimalalle. Muiden voimaloiden osalta toteutuneita tuotantoja verrattiin keskimääriin säteilytietoihin perustuviin teoreettisiin tuotantoihin. Keskimääriäisten säteilytietojen perusteella tuotantoon vaikuttavien tekijöiden merkitystä ei pystytty luotettavasti todistamaan, joten kyseisten kahdeksan voimalan osalta analyysit jäivät puutteellisiksi.

Molemmat tarkemmin analysoitavat voimat sijaitsevat Keski-Suomessa, toinen Muuramessa ja toinen Jämsässä. Voimat ovat asennettu tasakatoille kiinteisiin telineisiin 15° kallistuskulmaan.

Voimaloiden toteutuneet tuotantotiedot kerättiin voimaloissa käytetyiltä invertte-reiltä, ja auringon säteilytiedot kerättiin Ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta (Havaintojen lataus n.d). Säteilytietojen osalta jouduttiin käyttämään Jyväskylän lentoaseman säähavaintoaseman säteilytietoja, koska lähempää vuoden 2017 säteilytietoja ei ollut saatavilla. Vuoden 2017 säteilytietojen lisäksi selvitettiin myös Jyväskylän keskimääräiset säteilytiedot. Keskimääriäisten ja vuoden 2017 säteilytietojen perusteella voitiin vertailla, miten vuosi 2017 poikkesi aurinkosähkön tuotannon osalta keskimääräiseen vuoteen verrattuna.

Taulukossa 2 on esitetty keskimääräiset kokonaissäteilyn arvot sekä vuoden 2017 kokonaissäteilyn arvot Jyväskylässä. Taulukossa esitettyjen kokonaissäteilymäärien perusteella voidaan todeta, että vuosi 2017 oli Jyväskylässä aurinkosähkön tuotannon kannalta keskimääräistä vuotta lähes kymmenyksen (8,3 %) huonompi.

Taulukko 2. Keskimääräinen kokonaissäteily ja vuoden 2017 kokonaissäteily Jyväskylässä

Kuukausi	Kokonaissäteily vuonna 2017 (kW/m ²)	Keskimääräinen kokonaissäteily (kW/m ²)
Tammikuu	5,1	5,4
Helmikuu	18,0	20,1
Maaliskuu	59,8	51,9
Huhtikuu	96,3	102,9
Toukokuu	155,7	171,4
Kesäkuu	152,6	159,1
Heinäkuu	144,6	158,2
Elokuu	98,3	113,9
Syyskuu	55,6	71,1
Lokakuu	17,5	25,3
Marraskuu	6,7	7,3
Joulukuu	2,2	3,2
Vuosi	812,3	889,8
Erotus	-8,30 %	

Säteilymäärään perustuvan teoreettisen tuotannon ja toteutuneen tuotannon eroavaisuuksia tarkasteltiin sekä kuukausi- että tuntitasolla. Tuotantojen vertailu tuntitasolla oli ongelmallista, koska käytettävissä olleet säteilytiedot eivät vastanneet täysin voimalan sijainnin säteilytietoja. Tästä syystä tuotantojen vertailu kuukausitasolla tuotettavampia tuloksia, koska voidaan olettaa, että säteilytiedot ovat kuukausitasolla hyvin samankaltaiset Muuramessa, Jämsässä ja Jyväskylässä.

Voimaloiden teoreettisen tuotannon laskenta toteutettiin yhden pisteen mallilla (Ks. kaava 2), eli teoreettisen tuotannon laskennassa ei huomioitu järjestelmän häviöitä. Yhden pisteen mallilla tuotantoa laskettaessa täytyi selvittää säteilytietojen lisäksi järjestelmän paneelipinta-ala sekä paneelien hyötysuhde. Järjestelmän paneelipinta-ala saatiin selville kertomalla paneelien kokonaismäärä yhden paneelin pinta-alalla ja paneelien hyötysuhde laskettiin kaavalla 5.

$$\eta = \frac{P_{STC}}{(G_{STC} * A)} \quad (5)$$

missä P_{STC} = paneelin teho standarditestiolosuhteissa

G_{STC} = auringon säteilyn intensiteetti standarditestiolosuhteissa

A = paneelin pinta-ala

8.1 Muuramen aurinkovoimala

Muuramessa sijaitsevaan voimalaan oli tehty kesällä 2017 laajennus, joka huomioitiin laskennassa. Voimalan nimellisteho vuoden 2017 tammikuusta syyskuun loppuun oli 95 kW_p ja lokakuun alusta vuoden loppuun $122,4 \text{ kW}_p$. Voimalassa käytettyjen paneelien nimellisteho oli 265 W_p ja pinta-ala $1,64 \text{ m}^2$. Kyseisten tietojen perusteella laskettiin paneelipinta-alat ennen laajennusta ja laajennuksen jälkeen, sekä paneelien hyötysuhteet.

$$A_{95\text{kW}_p} = 357 * 1,64 \text{ m}^2 = 584,3 \text{ m}^2$$

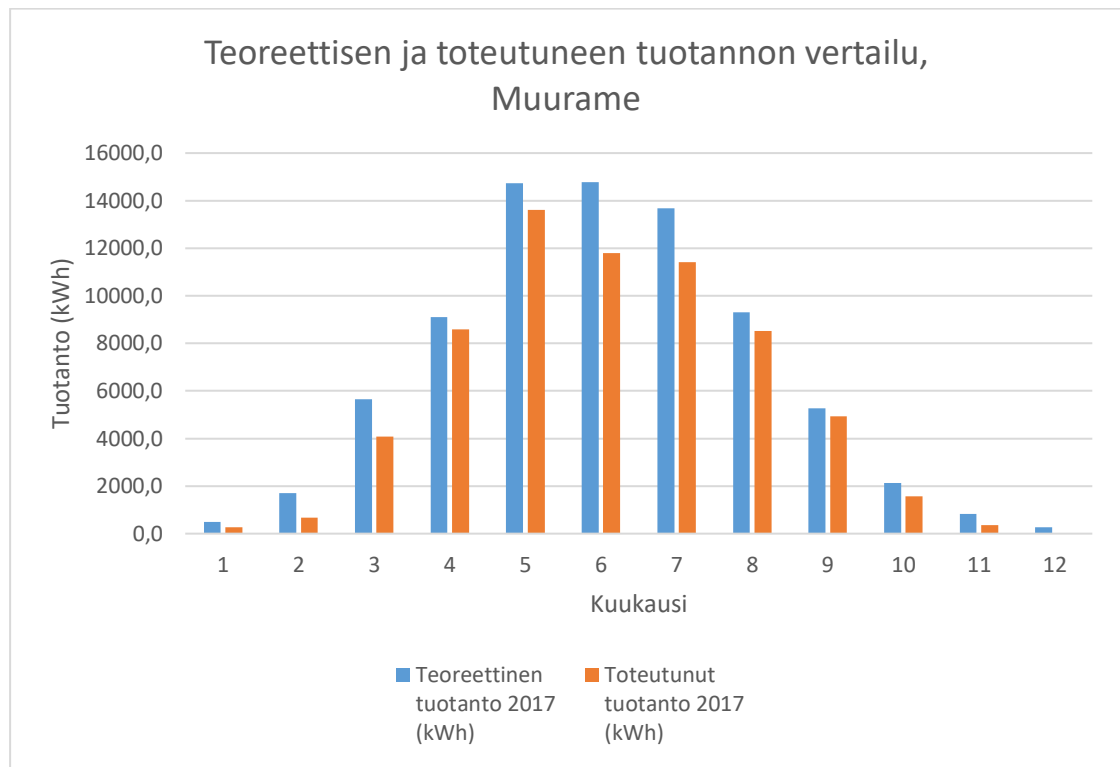
$$A_{122,4\text{kW}_p} = 462 * 1,64 \text{ m}^2 = 756,2 \text{ m}^2$$

$$\eta = \frac{265 \text{ W}_p}{\left(1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 1,64 \text{ m}^2\right)} = 16,19 \%$$

Taulukossa 3 ja kuviossa 21 on esitetty Muuramessa sijaitsevan aurinkovoimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu. Tuloksista ilmenee, että aurinkovoimalan toteutunut tuotanto oli lähimpänä teoreettista tuotantoa lokakuussa, jolloin toteutunut tuotanto oli 94,9 prosenttia teoreettisesta tuotannosta. Oleelliset erot teoreettisen ja toteutuneen tuotannon välillä syntyivät talvikuukausina. Huomionarvoista on myös kesä- ja heinäkuun aikaiset tuotantojen erot. Koko vuotta 2017 tarkastellessa, toteutunut tuotanto oli 84,5 prosenttia teoreettisesta tuotannosta.

Taulukko 3. Muuramen voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu

Kuukausi	Kokonaissäteily vuosi 2017 (kWh/m ²)	Teoreettinen tuotanto 2017 (kWh)	Toteutunut tuotanto 2017 (kWh)	Prosenttia teoreettisesta tuotannosta
Tammikuu	5,1	485,6	259,6	53,5 %
Helmikuu	18,0	1701,8	682,4	40,1 %
Maaliskuu	59,8	5660,6	4071,3	71,9 %
Huhtikuu	96,3	9110,3	8596,3	94,4 %
Toukokuu	155,7	14725,4	13607,0	92,4 %
Kesäkuu	156,2	14773,8	11803,0	79,9 %
Heinäkuu	144,6	13680,3	11404,0	83,4 %
Elokuu	98,3	9303,5	8526,0	91,6 %
Syyskuu	55,6	5259,1	4937,0	93,9 %
Lokakuu	17,5	2137,3	1568,0	73,4 %
Marraskuu	6,7	822,1	357,0	43,4 %
Joulukuu	2,2	266,8	0,0	0,0 %
Koko vuosi	816,0	77926,7	65811,6	84,5 %



Kuvio 21. Muuramen voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu

8.2 Jämsän aurinkovoimala

Jämsän aurinkovoimala oli nimellisteholtaan $95,4 kW_p$. Jämsän voimalassa oli käytetty Muuramen voimalan tavoin pinta-alaltaan $1,64 m^2$ ja teholtaan $265 W_p$ paneeleita, jolloin paneelien hyötysuhde oli sama kuin Muuramen voimalassa. Paneelipinta-alaa voimalalla oli

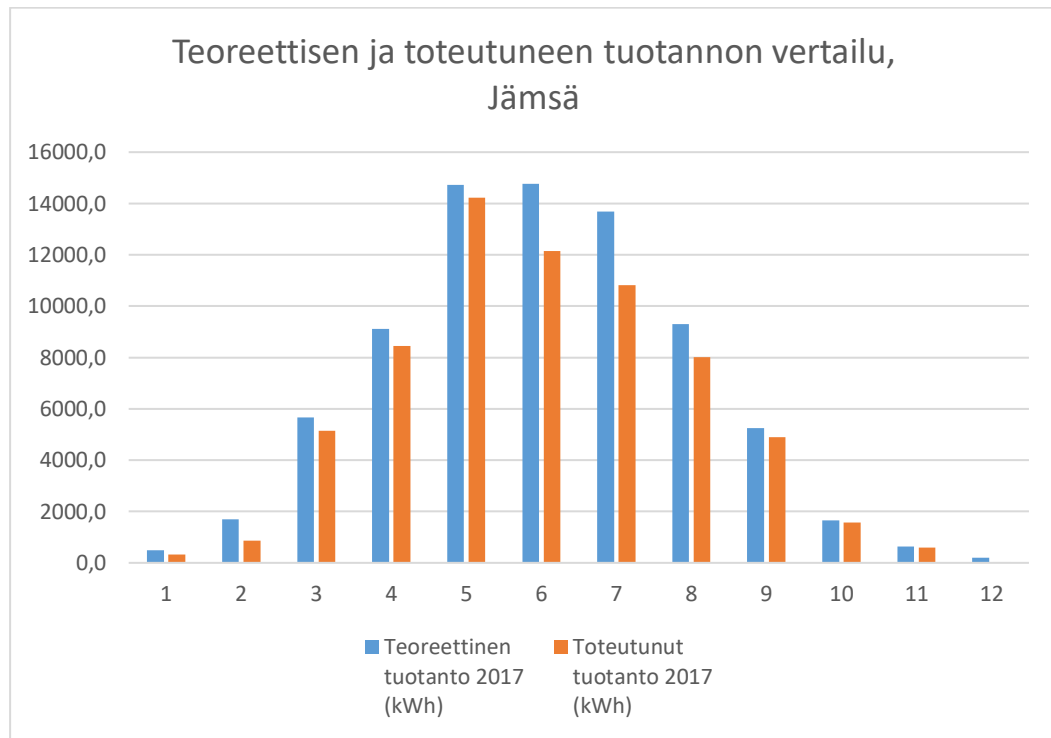
$$A = 357 * 1,64 m^2 = 584,3 m^2$$

Taulukossa 4 ja kuviossa 22 on esitetty Jämsässä sijaitsevan voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu. Jämsän voimalassa toteutunut tuotanto oli lähimpänä teoreettista tuotantoa toukokuussa, jolloin toteutunut tuotanto oli 96,6 prosenttia teoreettisesta tuotannosta. Suurimmat erot teoreettisen ja toteutuneen tuo-

tannon välillä esiintyvät joului-, tammi- ja helmikuussa sekä kesä-, heinä- ja elokuussa. Jämsän voimalan vuoden 2017 toteutunut kokonaistuotanto oli 86,9 prosenttia teoreettisesta tuotannosta.

Taulukko 4. Jämsän voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu

Kuukausi	Kokonaissäteily vuosi 2017 (kWh/m ²)	Teoreettinen tuotanto 2017 (kWh)	Toteutunut tuotanto 2017 (kWh)	Prosenttia teoreettisesta tuotannosta
Tammikuu	5,1	485,6	327,7	67,5 %
Helmikuu	18,0	1701,8	861,4	50,6 %
Maaliskuu	59,8	5660,6	5139,8	90,8 %
Huhtikuu	96,3	9110,3	8447,5	92,7 %
Toukokuu	155,7	14725,4	14220,5	96,6 %
Kesäkuu	156,2	14773,8	12143,1	82,2 %
Heinäkuu	144,6	13680,3	10812,8	79,0 %
Elokuu	98,3	9303,5	8011,2	86,1 %
Syyskuu	55,6	5259,1	4900,5	93,2 %
Lokakuu	17,5	2137,3	1578,1	95,6 %
Marraskuu	6,7	822,1	593,3	93,4 %
Joulukuu	2,2	266,8	27,0	13,1 %
Koko vuosi	816,0	77926,7	67063,0	86,9 %



Kuvio 22. Jämsän voimalan teoreettisen ja toteutuneen tuotannon vertailu

8.3 Muut aurinkovoimalat

Puutteellisista auringon säteilytiedoista johtuen tuotannon analyysit jäivät muiden voimaloiden osalta puutteellisiksi. Muista aurinkovoimaloista laadittiin samoja periaatteita käyttäen analyysit, jotka perustuivat voimalan sijainnin keskimääräisiin auringon säteilytietoihin.

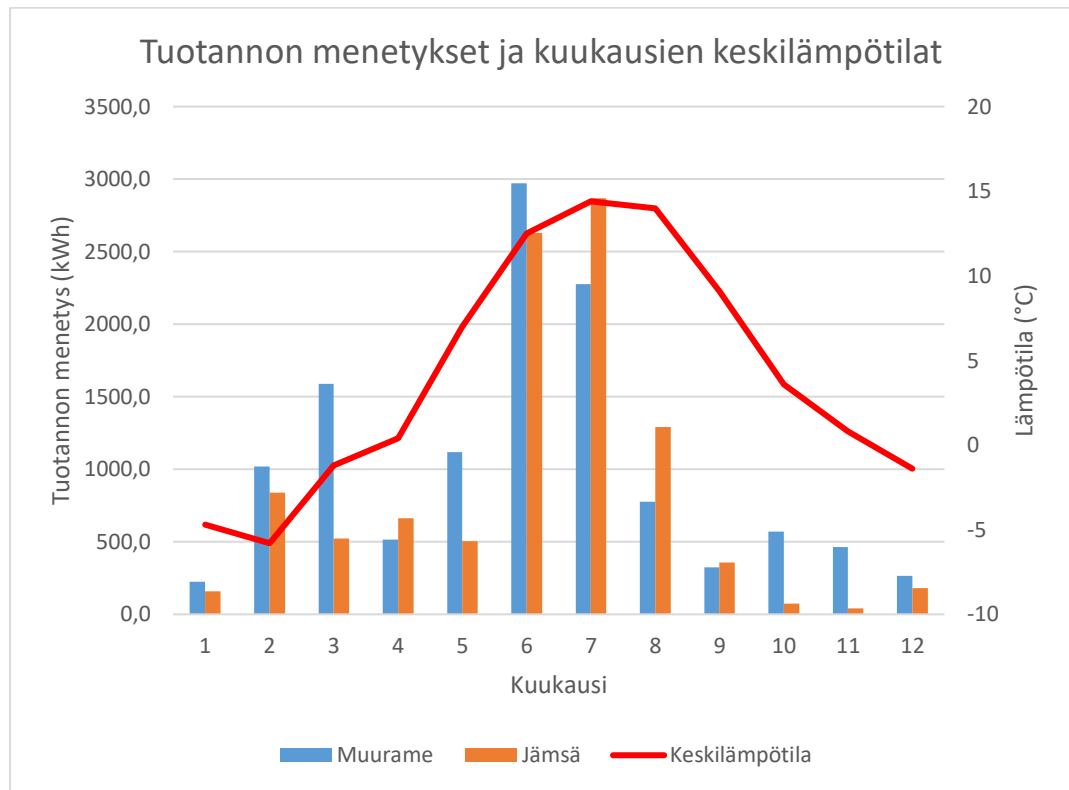
Keskimääräisiin säteilymääriin perustuvia teoreettisia tuotantoja tarkastellessa ongelmaksi ilmeni se, että tuotannon menetyksien aiheuttajaa ei pystytty etenkin kesäajalta luotettavasti vertailujen pohjalta osoittamaan. Tuloksissa oli eroavaisuuksia eri voimaloiden välillä, koska keskimääräiset säteilymäärät eivät vastaa vuoden 2017 säteilymääriä. Keskimääräisesti kaikkia kahdeksaa voimalaa tarkastellessa kesäajan tuotannon menetykset olivat noin 15 prosentin luokkaa, mikä vastaa melko hyvin tarkkoilla säteilymäärillä tarkasteltujen Muuramen ja Jämsän aurinkovoimaloiden kesäajan tuotannon menetyksiä.

Keskimääräisien säteilymäärien avulla tarkasteltujen voimaloiden tuotannon menetyksissä oli yksi selkeä yhtäläisyys. Kaikkien voimaloiden tuotannon menetykset olivat prosentuaalisesti tarkasteltuna suurimmat talviaikana.

9 Tulosten analysointi

Aurinkovoimaloiden tuotannon analysoinnin tekee haastavaksi se, että voimaloiden tuotanto on riippuvainen erittäin monesta tekijästä. Oleellisimpiin teoreettisen ja toteutuneen tuotannon eroavaisuuksiin löytyy kuitenkin selvät syy-seuraussuhteet. Oleellisimmat eroavaisuudet teoreettisissa ja toteutuneissa tuotannoissa tapahtuivat sekä talvikuukausina että kesäkuukausina. Aurinkovoimaloiden talvikuukausien tuotanto pienenee oleellisesti varjostumien vuoksi ja kesäkuukausina korkeamman lämpötilan vuoksi.

Talvella varjostumia aiheuttaa etenkin paneelien päälle kerääntyvä lumipeite. Toisaalta auringon säteilyn tulokulma on talviaikaan pienempi kuin muina vuodenaikoina, jolloin varjostavista objekteista ja paneeliriveistä muodostuvat varjot ovat suuremmat talvella kuin muina vuodenaikoina. Talvikuukausien osalta (marraskuu-helmikuu) on kuitenkin syytä huomioida, että säteilymäärät ovat merkittävästi pienemmät muihin vuodenaikoihin verrattuna. Tällöin talvikuukausina koetut tuotannon menetykset ovat energiamäärällisesti pienemmät kesään verrattuna, vaikka prosentuaalisesti tarkasteltuna ne olisivatkin suurempia.



Kuvio 23. Muuramen ja Jämsän voimaloiden tuotannon menetykset sekä kuukausien keskilämpötilat

Kuviossa 23 on havainnollistettu Muuramen ja Jämsän voimaloiden tuotantojen menetysten jakautumista kuukausitasolla ja kuukausittaiset keskilämpötilat. Kuukausittaiset keskilämpötilat on ladattu Ilmatieteenlaitoksen avoimen datan palvelusta (Havaintojen lataus n.d). Kuvaajasta nähdään selvästi, että oleellimmat tuotannon menetykset molempien voimaloiden osalta tapahtuvat kesä- ja heinäkuussa, jolloin myös kuukausien keskilämpötilat ovat korkeat. Kuvaajasta havaitaan myös, että Muuramen voimalan osalta tuotantoa menetettiin huomattavasti Jämsän voimalaa enemmän maaliskuussa, lokakuussa ja marraskuussa.

Tutkittaessa maaliskuussa, lokakuussa ja marraskuussa tuotannon menetyksiä aiheuttajaa, voidaan maaliskuussa osalta pääsyyllisenä pitää lumen aiheuttamia varjostuksia. Todennäköisesti lumipeite on sulanut Jämsän voimalalta hieman Muuramen voimalaa nopeammin, koska Muuramen voimalan paneeliryhmittelyä tarkemmin tutkittaessa ei ilmennyt, että ryhmittelyssä olisi tehty virheitä esimerkiksi sijoittamalla paneeleita

liian lähelle varjostavia objekteja. Tätä teoriaa tukee myös ilmatieteenlaitoksen lumensyvyyshavainnot, joiden mukaan lumet sulivat vuonna 2017 Jyväskylässä kokonaan vasta 10.04.2017 (Havaintojen lataus n.d.).



Kuvio 24. Lumitilanne Muuramen aurinkovoimalalla 28.3.2018

Kuviossa 24 on Muuramen voimalalla 28.03.2018 vieraillessa otettu kuva, joka havainnollistaa hyvin lumen vaikutuksia aurinkovoimaloiden tuotantoon. Paneelit on sijoitettu kuvassa näkyvien punaisten keppien vasemmalle puolelle ja ovat vielä maaliskuun lopussa täydellisesti lumen peitossa.

Kesäajan merkittävät tuotannon menetykset kuvastavat hyvin aurinkosähkötekniikan lämpötilariippuvaista toimintaa. Lämpiminä kesäpäivinä auringon paistaessa aurinkokennojen lämpötila voi helposti kohota Suomenkin olosuhteissa jopa 70 celsiusasteeseen. Tässä tapauksessa kennojen lämpötila on 45 celsiusastetta korkeampi kuin standarditestiolosuhteissa, mikä tarkoittaa paneelille, jonka lämpötilakerroin on $0,40 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$, 18 prosentin tuotannon menetyksen ($45^{\circ}\text{C} * 0,40 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} = 18\%$). Muuramen voimalan osalta suurin tuotannon menetys tapahtui kesäkuussa ja Jämsän voimalan osalta heinäkuussa (ks. Kuvio 23). Kyseisien kuukausien aikana molempien voimaloiden tuotannon menetys oli lähes 3 MWh, joka vastaa taloudellisessa mielessä satojen eurojen tappioita.

10 Johtopäätökset

Tuloksista ilmenee, että merkittävimmät aurinkovoimaloiden tuotantoon vaikuttavat tekijät ovat varjostukset sekä aurinkokennojen lämpötila. Tuotantoa päädyttiin analysimaan kuukausitasolla, koska säteilytiedot eivät vastanneet täysin voimaloiden sijaintia ja täten tutkimustulosten luotettavuus olisi heikentynyt oleellisesti. Kuukausitasolla tehdystä tutkimuksesta voidaan päätellä vain lumen aiheuttamien varjostusten tuotannon menetyksen määrää. Muita varjostuksia esiintyy epäsäännöllisesti ja niistä aiheutuvien tuotannon menetysten toteamiseen tuotantoa tulisi analysoida tuntitasolla. Tällöin voitaisiin saada esimerkiksi selville, että tiettyinä vuodenaikana auringon noustessa voimalan tuotanto jää reilusti teoreettisesta tuotannosta, mikä voisi johtua varjostusten aliarvioinnista voimalan asennusvaiheessa.

Tutkimustulosten perusteella talvella lumesta johtuvat varjostukset laskevat voimaloiden tuotantoa merkittävästi teoreettiseen tuotantoon nähden. Energiamäärällisesti tuotannon menetys on kuitenkin niin pieni, että etenkin ennen maaliskuuta lunta ei ole kustannustehokasta käydä puhdistamassa paneelipinnoilta.

Kesäkuukausina aurinkovoimaloiden tuotanto pienenee säteilymäärään perustuvasta teoreettisesta tuotannosta energiamäärällisesti eniten. Kesäkuukausien tuotannon menetykset selittyvät aurinkokennojen ominaisuudella, missä kennojen tuottama jännite pienenee lämpötilan noustessa.

11 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten aurinkovoimaloiden tuotanto eroaa säteilymäärään perustuvasta teoreettisesta tuotannosta ja miten voimaloiden tuotanto saataisiin maksimoitua. Tavoitteiden saavuttamiseksi työssä tuli selvittää aurinkovoimaloiden tuotantoon vaikuttavat tekijät ja tekijöiden merkitys tuotantoon.

Voimaloiden tuotannon maksimointia tutkittaessa oleelliseksi tutkimuskohdaksi valikoitui viime vuosina markkinoille tulleiden älykkäiden järjestelmien vaikutus aurinkovoimaloiden tuotantoon. Tieto älykkäiden järjestelmien vaikutuksista tuotantoon rajoittui pääosin älykkäiden komponenttien valmistajien ilmoittamiin arvoihin, joita ei voida pitää täysin luotettavana. Suomessa älykkäitä järjestelmiä koskevia tutkimuksia ei oltu tehty lainkaan ja ulkomaillakin hyvin vähän. Tämän takia opinnäytetyöhön päätettiin sisällyttää käytännönläheinen esimerkkilaskelma, jossa verrattiin älykkään ja perinteisen järjestelmän toimintaa aurinkovoimalalle tyypillisessä varjostustilanteessa.

Opinnäytetyön tärkeimpinä tuloksina olivat toimeksiantajan aurinkovoimaloiden toteutuneiden tuotantojen ja säteilymääriin perustuvien teoreettisten tuotantojen eroavaisuudet. Tuloksista ilmenee selvästi, miten aurinkovoimaloiden tuotanto jakautuu kuukausitasolla ja mitkä ovat oleellisimmat tuotantoon vaikuttavat tekijät.

Tuloksista yllätti hieman se, miten suuri merkitys lämpötilalla on aurinkovoimaloiden tuotantoon. Suomen olosuhteet ovat suotuisat aurinkovoiman tuotannolle, koska kesällä valoisaa aikaa on paljon, mutta lämpötilat ovat silti matalahkot esimerkiksi Etelä-Eurooppaan verrattuna. Suomen olosuhteissakin aurinkovoimaloiden tuotanto pienenee merkittävästi lämpiminä kesäpäivinä.

Opinnäytetyössä haastavinta oli pitää työn teoriaosio tarpeeksi tiiviinä, mutta kattavana. Teoriaosio laajeni helposti ja sitä jouduttiin tiivistämään, jotta työn pääpaino säilyi nimenomaan aurinkovoimaloiden tuotantoon liittyvissä asioissa. Työssä on käsitelty melko laajasti energiapolitiikan merkitystä aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvuun Suomessa. Tämä johtuu siitä, että aurinkoenergiaan liittyvät energiapoliitti-

set päätökset ovat tällä hetkellä Suomessa epämääräisiä ja toimivat jarruttavana tekijänä aurinkoenergian kasvun suhteen. Työssä haluttiin ottaa kantaa myös tähän seikkaan, vaikka se ei suoranaisesti opinnäytetyön tutkimusongelmaan liittynytkään.

Opinnäytetyö eteni suunnitellussa aikataulussa. Aikataulun seuraaminen helpotti työn tekoa erittäin paljon, koska suurempia kokonaisuuksia voitiin pilkkoa pienempiin osiin. Tällöin työn suorittaminen oli jouhevampaa ja eteni jatkuvasti. Tyytyväisiä voidaan olla myös opinnäytetyön teoriaosuuden lähteiden luotettavuuteen ja ajan-kohtaisuuteen. Aurinkoenergia-ala on ottanut suuria kehitysaskelita ja alan tekniikka kehittyä edelleen vuosittain. Lähteitä käytettäessä pyrittiin valitsemaan aina mahdollisimmat tuoreet lähteet ja verrata samaa asiaa eri lähteistä, jotta tietoihin voitiin varmasti luottaa. Lähdekriittisyyteen auttoi myös aiemmin hankittu aurinkovoimaan liittyvä tieto työkokemuksen pohjalta.

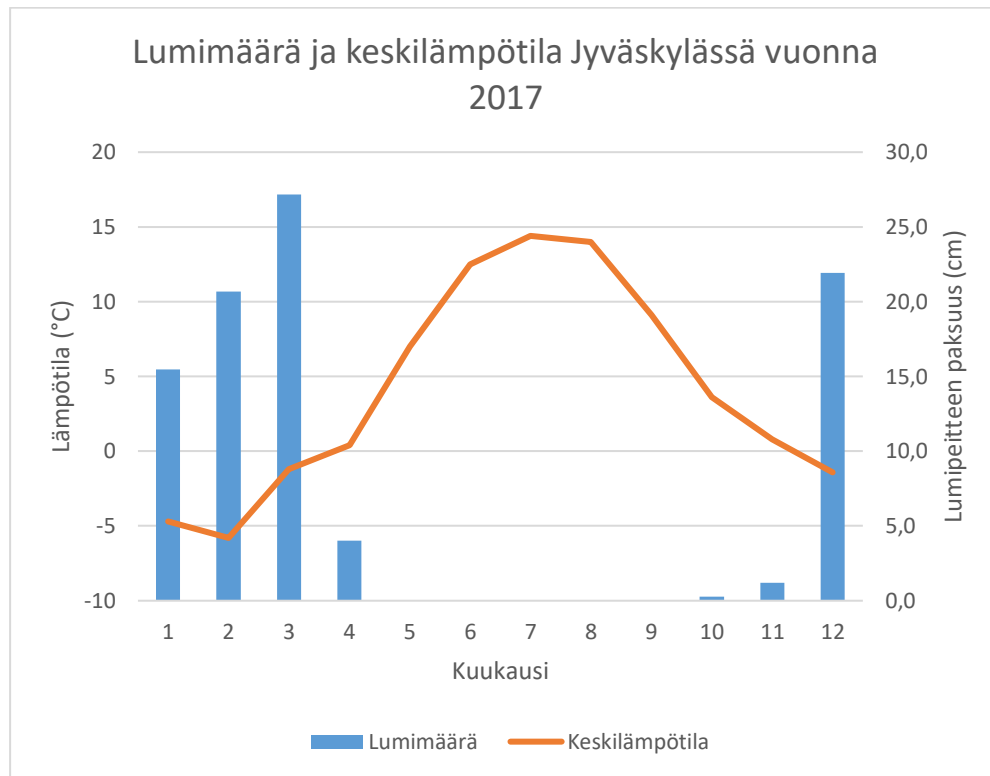
Tulosten luotettavuutta arvioidessa voidaan käyttää käsitteitä validiteetti ja reliabiliteetti. Validiteetti tarkoittaa, että tutkimuksessa mitataan oikeita asioita ja reliabiliteetti tutkimustulosten pysyvyyttä. Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa oleellisesti se, että aurinkovoimaloiden tuotantoa analysoitiin vain yhden vuoden perusteella. Aurinkovoimaloiden tuotannon määrä ja tuotannon jakautuminen vuositasolla voi vaihdella eri vuosien välillä paljonkin. Tulosten validiteettia pyrittiin parantamaan hyödyntämällä teoreettisen tuotannon laskennassa yhden pisteen mallia, jossa käytännössä ainut epävarmuustekijä oli auringon kokonaissäteilyn määrä, joka ei täysin vastannut voimaloiden sijainnin säteilymääriä. Säteilymäärä on jatkuvasti muuttuva tekijä, jolloin tutkimustulosten reliabiliteetti on matala. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jos sama tutkimus toistetaan vuonna 2018, voivat tulokset erota merkittävästi vuodesta 2017. Se ei kuitenkaan johdu tutkimuksessa käytettyjen mittareiden epästabiiliudesta, vaan ilmiön todellisista muutoksista. (Kananen 2011, 118–119.)

Tutkimuksen reliabiliteettia voitaisiin parantaa tutkimalla aurinkovoimaloiden tuotantoa pidemmällä aikavälillä. Vuoden mittainen tutkimusjakso oli kuitenkin tällä hetkellä pisin mahdollinen, koska vuosi 2017 oli ensimmäinen vuosi, jolloin toimeksiantajan omistamat aurinkovoimalat olivat käytössä koko kalenterivuoden. Tutkimuksen validiteettia voitaisiin puolestaan parantaa asentamalla jokaisen voimalan yhteyteen sääasemat, jotka mittaisivat voimaloiden sijainnin olosuhteita.

Opinnäytetyöprosessissa ongelmallisinta oli ehdottomasti auringon kokonaissäteilyn tarkkojen arvojen selvittäminen paikoista, joissa voimalat sijaitsivat. Oletuksena opinnäytetyötä aloittaessa oli, että säteilytietoja kerättäisiin tänä päivänä niin kattavasti, että niiden saaminen olisi mahdollista käytännössä sijainnista riippumatta. Tämä ei kuitenkaan pitänyt paikkaansa, vaan tarkkoja säteilytietoja oli saatavilla vain kahdeksalta havaintoasemalta Suomessa.

Alun perin tarkoituksena oli, että teoreettista ja toteutunutta tuotantoa olisi vertailtu tuntitasolla. Säteilytietojen puutteellisuus johti kuitenkin siihen, että tuotantoja päädyttiin vertailemaan kuukausitasolla, koska tulosten luotettavuus olisi kärsinyt oleellisesti tuntitason tarkastelussa. Tällöin teoreettista ja toteutunutta tuotantoa vertaillessa oltaisiin voitu tehdä vääriä johtopäätöksiä etenkin varjostusten suhteen. Toisaalta kuukausitason tarkastelussa ei päästä käsiksi tarkasti esimerkiksi järjestelmien suuntauksien ja kallistuskulmien aiheuttamiin vaikutuksiin tuotannossa.

Työssä hyödynnettiin korrelaatioanalyysia soveltaen. Korrelaatioanalyysin avulla mitataan kahden muuttujan, kuten aurinkovoimalan tuotannon ja ympäristön lämpötilan välistä riippuvuutta ja riippuvuuden voimakkuutta (Kananen 2011, 108). Haastavaa aurinkovoiman tuotannon analysoinnista teki tuotantoon vaikuttavien tekijöiden määrä ja niiden riippuvuus myös muista tuotantoon vaikuttavista tekijöistä. Tarkastellessa pelkän lämpötilan vaikutusta aurinkovoimalan tuotantoon korrelaatioanalyysia hyödyntäen tulokseksi saataisiin, että suurimmat tuotannon menetykset tapahtuvat lämpötilan ollessa alle nollan celsiusasteen ja lämpötilan ollessa korkeimmillaan. Lämpötilan ollessa alle nollan celsiusasteen aurinkovoiman tuotannon menetykset eivät kuitenkaan johdu lämpötilasta, vaan varjostuksista. Lämpötilan ollessa alle nollan celsiusasteen varjostusten määrä kasvaa, koska sataessa sade tulee lumena, joka kinostuu paneeleiden päälle.



Kuvio 25. Keskimääräisten lämpötilojen ja keskimääräisten lumimäärien välinen riippuvuus

Kuviossa 25 on havainnollistettu kahden oleellimmän aurinkovoiman tuotantoon vaikuttavan tekijän eli lämpötilan ja lumen aiheuttamien varjostuksien välistä riippuvuutta. Kuvaajasta voidaan tulkita, että lumen määrä kasvaa lämpötilan laskiessa alle nollan celsiusasteen. Tämä loi haasteita korrelaatioanalyysia hyödyntäessä.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää aurinkovoimaloiden suunnittelu- ja asennusvaiheessa. Opinnäytetyö sisältää kattavasti tietoa siitä, mitä suunnittelijan tulee ottaa huomioon, kun aurinkovoimalaa suunnitellaan. Oleellista suunnittelijan kannalta on ymmärtää oleellimmat aurinkovoimalan tuotantoon vaikuttavat tekijät koko järjestelmän elinkaaren aikana. Opinnäytetyöhön pyrittiin sisällyttämään käytännönläheisiä keinoja tuotannon maksimoimiseksi, joita voidaan hyödyntää voimaloiden asennus- ja suunnitteluvaiheessa syntyvien ongelmien ratkaisemiseksi. Tyypillinen asennusvaiheen ongelma voi olla esimerkiksi se, kuinka paljon asentajan tulee jättää tilaa katolla sijaitsevan varjostavan objektin ja paneelin välille. Opinnäyte-

työssä keskityttiin ennen kaikkea teollisuuskokoluokan aurinkovoimaloihin, mutta tuloksia voidaan hyödyntää myös pienemmissä aurinkovoimaloissa, kuten esimerkiksi omakotitalojen aurinkosähköjärjestelmissä.

Älykkäisiin aurinkovoimaloihin liittyvää esimerkkilaskelmaa voidaan hyödyntää pohdittaessa, onko älykkäisiin aurinkovoimaloihin investoiminen kustannusmielessä viisasta. Esimerkkilaskelmassa varjostunut alue oli pieni suhteessa paneeliketjun kokonaispinta-alaan ja mitä enemmän varjostumia syntyy paneeleille, sitä kannattavampia älykkäissä järjestelmissä käytetyt tehon optimoijat ovat. Teollisuuskokoluokan aurinkovoimaloissa varjostukset pystytään kuitenkin tyyppillisesti minimoimaan suunnitteluvaiheessa. Tästä syystä investoimista älykkäisiin järjestelmiin pelkästään tuotannon parantamisen johdosta kannattaa harkita tarkkaan. Älykkäiden järjestelmien suurimmat hyödyt saavutetaan parantuneen turvallisuuden ja paneelikohtaisen tuotannon seurannan avulla. Edellä mainitut seikat tosin vaativat älyn lisäämistä jokaiseen paneeliin, jolloin kustannukset nousevat merkittävästi.

Lämpötilan vaikutus aurinkovoimaloiden tuotantoon on suuri ja se aiheuttaa kesäkuukausina merkittäviä tuotannon menetyksiä jopa Suomen Pohjoisesta sijainnista huolimatta. Aurinkokennojen lämpötilan hallinta on haastava ja mielenkiintoinen ongelma. Jatkotutkimuksena tätä ilmiötä tulisi tutkia laajemmin, miten esimerkiksi aurinkopaneelit ja aurinkokeräimet voitaisiin yhdistää yhdeksi ”hybridipaneeliksi”, jossa keräinosa siirtäisi lämmön aurinkokennoilta esimerkiksi lämminvesivaraajaan ja paneeliosa tuottaisi sähköä paremmalla hyötysuhteella.

Säteilytietojen puutteellisuuden vuoksi aurinkovoiman tuottajien tulisi ehdottomasti lisätä voimaloiden yhteyteen omat sääasemat. Sääasemien tulisi mitata ainakin aurinkon kokonaissäteilyn määrää, aurinkokennojen- ja ympäristön lämpötilaa, sekä tuulen nopeutta. Säädatan avulla aurinkovoiman tuottajat voisivat selvittää tarkkoja syy-seuraussuhteita hetkittäisille tuotannon menetyksille.

Opinnäytetyön tekeminen oli mielenkiintoista ja haastavaa. Tietoperustan kirjoittaminen oli odotettua haastavampaa ja hitaampaa, koska lähteiden luotettavuutta joutui jatkuvasti arvioimaan. Haastavin ja samalla mielenkiintoisin yksittäinen osuus opinnäytetyössä oli ehdottomasti älykkäisiin voimaloihin liittyvän esimerkkilaskelman

laatiminen. Älykkäiden järjestelmien toimintaperiaatteen selvittäminen vei paljon aikaa ja puolueetonta tietoa älykkäistä järjestelmistä oli hyvin vaikea löytää. Esimerkkilaskelmassa jouduttiin tekemään jonkun verran olettamuksia, jotta laskelma pysyi helposti ymmärrettävänä. Kaiken kaikkiaan opinnäytetyön tuloksiin voidaan olla tyytyväisiä.

Lähteet

- ABB string inverters. N.d. ABB PRO-33.0-TL-OUTD invertterin datalehti ABB:n www-sivuilla. Viitattu 28.2.2018. <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000164968&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- Aurinkoenergiainvestointien tuet. 2016. FinSolarin www-sivuilla. Viitattu 15.2.2018. <http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankintaohjeita/lait-ja-saadokset/haettavat-tuet-aurinkoenergialle/>
- Aurinkosähkö kasvaa rajusti lähivuodet – Suomi kirii, mutta Ruotsi menee vauhdilla edelle. 2017. Uutinen Ylen www-sivuilla 11.07.2017. Viitattu 10.2.2018. <https://yle.fi/uutiset/3-9691921>
- Aurinkosähköteknologiat. 2017. Artikkelin Motivan www-sivuilla. Viitattu 16.2.2018. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat
- Auvinen, K., Lovio, R., Jalas, M., Juntunen, J., Liuksiala, L., Nissilä, H. & Müller, J. 2016. FinSolar: Aurinkoenergian markkinat kasvuun Suomessa. Raportti Aalto Yliopiston www-sivuilla. Viitattu 8.2.2018. <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/20264/isbn9789526067674.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- AS-P60 250-275W Solar Module. N.d. Aurinkopaneelin datalehti Ankara Solarin www-sivuilla. Viitattu 26.3.2018. <http://www.ankarasolar.com.tr/en/wp-content/uploads/2014/04/as-p60-250-275-eng.png>
- Ball, J. 2017. Germany's High-Priced Energy Revolution. Fortuna-lehden artikkeli maaliskuulta 2017. Viitattu 4.2.2018. <http://fortune.com/2017/03/14/germany-renewable-clean-energy-solar/>
- Blazev, A. 2012. Photovoltaics for Commercial and Utilities Power Generation. Fairmont Press Inc.
- Böök, H. 2016. Aurinkoenergiatuotannon ennustushaasteet. <http://www.bcdcenergia.fi/aurinkoenergiatuotannon-ennustushaasteet/>
- Country and regional maps. 2017. Säteilykartat Euroopan Komission www-sivuilla. Viitattu 15.2.2018. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html
- Design into Shade. N.d. Artikkelin Tigo Energyn www-sivuilla. Viitattu 14.3.2018. <https://support.tigoenergy.com/hc/en-us/articles/202368878-Design-into-Shade>
- Energiatehokasta sähköntuotantoa – tehokkaat aurinkopaneelit avaimet käteen – periaatteella. N.d. Tuote-esite Lem-Kem Oy:n www-sivuilla. Viitattu 23.2.2018. <http://www.lemkem.fi/Aurinkoenergia>
- Energiavuosi 2017 – sähkö. 2018. Esitys energiatoimintasuunnitelman www-sivuilla 23.01.2018. Viitattu 6.2.2018. https://energia.fi/ajankohtaista_ ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot
- Erat, B., Hänninen, P., Nyman, C., Rasinkoski, A., Tahkokorpi, M. & Wiljander, M. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into.

- Forsström, L. 2016. Jäähyväiset? Raportti ilmastonmuutoksen vaikutuksista Suomen arktiseen eläinlajistoon. Helsinki: WWF Suomi.
- Freeman, J. & Ryberg D. 2017. Integration, Validation and Application of a PV Snow Coverage Model in SAM. National Renewable Energy Laboratory.
- Gevorkian, P. 2012. Large-Scale Solar Power Systems – Construction and Economics. Cambridge University Press.
- Havaintojen lataus. N.d. Avoimen datan havaintojen lataus -palvelu Ilmatieteenlaitoksen www-sivuilla. Viitattu 2.3.2018 ja 28.3.2018. <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>
- Huttunen, R. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.
- Häberlin, H. 2012. Photovoltaics System Design and Practice. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Ilmastonmuutos ja energia. 2010. Esitysmateriaalia ilmastonmuutoksesta ja energiasektorista. Esitys Energiateollisuus ry:n LinkedIn SlideSharessa. Viitattu 5.4.2018. <https://www.slideshare.net/energiateollisuus/ilmastonmuutos-ja-energia>
- Kalogirou, S. 2018. McEvoy's Handbook of Photovoltaics – Fundamentals and Applications (3rd Edition). Elsevier.
- Kananen, J. 2011. Kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- K-ryhmästä Suomen suurin aurinkosähkön tuottaja. Hyvät kokemukset aurinkoviomasta. 2016. Lehdistötiedote Kesko Oyj:n www-sivuilla 19.12.2016. Viitattu 5.2.2018. <https://www.kesko.fi/media/uutiset-ja-tiedotteet/lehdistotiedotteet/2016/k-ryhmasta-suomen-suurin-aurinkosahkon-tuottaja/>
- Käpylehto, J. 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into
- Labouret, A. & Viloz, M. 2010. Solar Photovoltaic Energy. Institution of Engineering and Technology.
- Lehto, I., Orrberg, M., Liuksiala, L., Lähde, P., Olenius, M. & Ylinen, M. 2017. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Espoo: Sähköinfo Oy.
- Müller, J. 2015. Aurinkopaneeleihin ja –keräimiin tarvittavia mineraaleja on maapallolla rajallisesti ja niiden saatavuuden turvaaminen – tai korvaaminen – on tärkeää. Viitattu 15.1.2018. <http://www.finsolar.net/aurinkoenergia/ymparistovaikutukset/>
- Renewable Energy Sources in Figures. 2017. Raportti BMWi:n www-sivuilla. Viitattu 6.2.2018. https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Renewables 2017 Global Status Report. 2017. REN21:n laatima raportti uusiutuvan energian nykytilanteesta REN21:n www-sivuilla. Viitattu 6.2.2018. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf

Salo, M. 2015. Energiäkäännö. Saksan ja Suomen energiapoliittiset valinnat. Tampere: Hämeen kirjapaino Oy.

SolarEdge commercial solutions for increased revenue & advanced asset management. N.d. Esite Solar Edge:n www-sivuilla. Viitattu 15.2.2018.

https://www.solaredge.com/sites/default/files/se_investors_catalogue-na.pdf

Solar PV. N.d. Artikkelit Williams Collegen www-sivuilla. Viitattu 6.2.2018. <https://sustainability.williams.edu/renewable-energy/solar-pv>

Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertaistui vuodessa. Uutinen energiaviraston www-sivuilla. Viitattu 6.2.2018. <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaistui-vuodessa>

Technical Note – Bypass Diode Effects in Shaded Conditions. 2010. Artikkelit SolarEdgen www-sivuilla. Viitattu 15.3.2018. https://www.solaredge.com/sites/default/files/se_technical_bypass_diode_effect_in_shading.pdf

TrinaSolar. N.d. TSM-PD05.08S paneelin datalehti TrinaSolarin www-sivuilla. Viitattu 7.3.2018. http://static.trinasolar.com/sites/default/files/PS-M-0377%C2%A0B%C2%A0Datasheet_Trinaswitch_US_Feb_2017_A.pdf

Tuotantotuki. N.d. Artikkelit Energiaviraston www-sivuilla. Viitattu 9.4.2018. <https://www.energiavirasto.fi/tuotantotuki1>

Tyni, M. 2016. Aurinkoenergian kannattavuus ja toteutus teollisuussähköverkossa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Uusiutuvan energian investoinnit 2018 (Tavanomainen teknologia). 2018. Energia-tuen määrä 2018. Business Finlandin www-sivuilla. Viitattu 8.2.2018. <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/pk-ja-mid-cap-yritys/energiatuki/>

Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. 2016. Artikkelit Motivan www-sivuilla. Viitattu 17.2.2018. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma

Liitteet