



# Aurinkosähköjärjestelmän tuotavuuden parantaminen

Hannes Heikkilä

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2020

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

HEIKKILÄ HANNES:

Aurinkosähköjärjestelmän tuottavuuden parantaminen

Opinnäytetyö 45 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Huhtikuu 2020

---

Tämä opinnäytetyö toimii lukijalle ohjeena sekä aurinkosähköjärjestelmän suunnittelulle, että järjestelmän hankintaan liittyviin asioihin. Opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä keskenään sekä selvittää aurinkosähköjärjestelmien häviöitä, miten niitä voidaan mallintaa ja vähentää sekä muita tapoja nostaa järjestelmien tuottavuutta. Työ tehtiin Ralos Eco Oy:n toimeksiannosta.

Työssä vertailtiin 12 Suomessa sijaitsevan aurinkosähköjärjestelmän tuottavuutta sekä eri invertterivalmistajien painotettuja hyötysuhteita. Järjestelmien vertailussa keskityttiin suoraan verkkoon kytkettyihin järjestelmiin. Järjestelmien tuottavuuksien ja niiden saaman säteilyn avulla selvitettiin niiden tehontuotto-kyky, joita vertailtiin keskenään.

Työssä käytiin läpi laajasti aurinkosähkön teoriaa, sillä tuottavuutta laskevat häviöt on helpompi käsittää, kun käsittää aurinkokennojen toimintaperiaatteen. Lisäksi työssä selvitettiin aurinkosähköjärjestelmien häviöitä ja niiden mallintamista. Erilaisten järjestelmien välillä tehtiin myös vertailua häviöiden osalta.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Electrical and automation engineering  
Electrical power engineering

HEIKKILÄ HANNES:  
Improving the yield of a photovoltaic system

Bachelor's thesis 45 pages, appendices 1 page  
April 2020

---

This thesis informs reader on designing of a photovoltaic system and things to consider when buying a PV system. The purpose of this thesis was to compare different kinds of PV systems and to determine the losses of PV systems, specifically on how to model and reduce them. Also, other means to improve the yield was discussed. This thesis was commissioned by Ralos Eco Oy.

This thesis contains comparisons on performance of 12 grid connected photovoltaic systems located in Finland during a year and the weighted efficiency of different inverter manufacturers. Based on the yield of the systems and the average irradiation levels during a year a performance ratio was calculated for the systems.

Extensive amount of theory behind PV systems was discussed as the losses which lower the yield are easier to comprehend when one knows the working principles of solar cells. Additionally, the losses of PV systems were studied, and the losses were compared between different kinds of systems.

---

Key words: photovoltaic, pv system, solar panel, solar energy, inverter

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	8
2	AURINKOSÄHKÖTEKNIIKAN TEORIA.....	9
2.1	Aurinkokennojen toimintaperiaate .....	9
2.1.1	Sähkömagneettinen säteily ja valosähköinen ilmiö.....	9
2.1.2	Aurinkokennon rakenne.....	10
2.1.3	Aurinkokennon virta-jännitekäyrä .....	12
2.2	Aurinkokennon toiminnan riippuvuus ulkoisista tekijöistä .....	13
2.3	Aurinkopaneelityypit.....	14
2.3.1	Piikkennoaurinkopaneelit .....	14
2.3.2	Bifacial-aurinkopaneelit .....	15
2.3.3	Ohutkalvoaurinkopaneelit.....	16
2.3.4	Half cut -paneelit.....	17
2.3.5	Moniliitosaurinkokennot .....	17
2.3.6	Aurinkokennojen hyötysuhteet .....	18
2.4	Ohitus- ja estodiodit .....	19
2.5	Invertterit .....	20
2.5.1	MPPT .....	21
2.5.2	Vakiojännitemenetelmä .....	22
2.5.3	Oikosulkumenetelmä .....	22
2.5.4	Tyhjäkäyntijännitemenetelmä .....	22
2.5.5	Naapuruushakumenetelmä .....	23
2.5.6	Vähittäiskonduktanssimenetelmä .....	23
2.5.7	Lämpötilamenetelmä .....	23
3	JÄRJESTELMIEN VERTAILU .....	25
3.1	Tuottavuuksien vertailu .....	25
3.2	Hyötysuhteiden vertailu.....	28
4	TUOTTAVUUDEN PARANTAMINEN .....	32
4.1	Häviöt.....	32
4.1.1	Ohmiset häviöt.....	33
4.1.2	Lämpötilahäviöt .....	34
4.1.3	Mismatch-häviöt .....	34
4.1.4	Varjostumat .....	36
4.1.5	Kennojen tuotantokyvyn heikkeneminen .....	36
4.1.6	PID .....	37
4.1.7	DC- ja AC-häviöiden vertailu .....	38
4.2	Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa huomioitavat asiat .....	39

4.2.1 Mitoitus .....	39
4.2.2 Mekaaninen suunnittelu.....	40
4.3 Huolto ja kunnossapito .....	40
5 POHDINTA .....	42
LÄHTEET.....	43
LIITTEET .....	45
Liite 1. Aurinkosähköjärjestelmien tekniset ja tutkimuksesta saadut tiedot.....	45

## ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
P-Si	Monikidepiiaurinkokenno
M-Si	Yksikidepiiaurinkokenno
A-Si	Amorfinen piiaurinkokenno
CdTe	kadmiumtelluuridiaurinkokenno
CIGS	kupari-indium-gallium-selenidiaurinkokenno
PID	Potential Induced Degradation
LID	Light Induced Degradation
DC	Tasasähkö
AC	Vaihtosähkö
E	Kvantin energia
h	Plancin vakio
c	Valonnopeus tyhjiössä
$\lambda$	Sätilyn aallonpituus
I	Sähkövirta
U	Jännite
$U_{stc}$	Kennon tyhjäkäyntijännite standardiolosuhteissa
$(dU_0/dT)$	Paneelin lämpötilagradientti
$T_{stc}$	Kennon lämpötila standardiolosuhteissa
W	Tuotettu sähköteho
E	Säteilyintensiteetti
$P_N$	Aurinkosähköjärjestelmän nimellisteho
$\eta$	Hyötysuhde
P	Sähköteho
R	Resistanssi
T	Lämpötila
$\beta$	Aurinkopaneelin lämpötilakerroin
C	paneelin ominaisuuskerroin
$\sigma_{Imp}$	maksimithepisteen virran keskihajonta
$I_{mp}$	maksimithepisteen virta
L	paneeleiden määrä ketjussa

$U_{mp}$	maksimitehopisteen jännite
$I_{sc}$	oikosulkuvirta
$U_{oc}$	tyhjäkäyntijännite

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Raloksen kanssa. Ralos on vuonna 2017 perustettu aurinkosähköjärjestelmiä toimittava yritys Tampereelta. Järjestelmiä toimitetaan sekä yrityksille, että yksityisille.

Aurinkoenergia on Suomessa voimakkaassa kasvussa. Asennettujen aurinkovoimaloiden nimellisteho on vuodesta 2015 lähtien noin tuplaantunut joka vuosi. Samalla aurinkopaneeleiden hinta on pysynyt tasaisessa laskussa. Aurinkoenergian osuus Suomen sähköntuotannosta on kuitenkin toistaiseksi vain noin 0,1 %. (IEA 2019)

Yksi syy kasvaneelle kysynnälle on tuotetun energian uusiutuvuus, mikä on ilmastoyleistä kasvattanut kysyntää. Myös etenkin aurinkopaneeleiden tasaisesti laskenut hinta 2000 – ja 2010 – luvuilla on lisännyt kysyntää. Aurinkosähköjärjestelmistä on alentuneiden hintojen myötä tullut taloudellisesti kannattavia sijoituksia pitkällä aikavälillä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla eri tyyppin ja eri valmistajien aurinkosähköjärjestelmiä tuottavuuden näkökulmasta. Työssä vertailtiin todellisten aurinkosähköjärjestelmien tuottavuuksia sekä eri invertterivalmistajien hyötysuhteita keskenään. Työssä selvitettiin myös aurinkosähköjärjestelmän häviöitä ja tapoja, miten niitä voidaan mallintaa ja vähentää. Lisäksi pohdittiin muita tapoja, miten tuottavuutta voitaisiin parantaa. Työssä keskityttiin suoraan verkkoon kytettyihin järjestelmiin.



## 2 AURINKOSÄHKÖTEKNIIKAN TEORIA

Tässä luvussa käsitellään fysikaalista teoriaa aurinkosähkön tuottamisen taustalla, sekä käydään läpi aurinkosähköjärjestelmän komponentteja ja muuta aurinkosähköjärjestelmien tekniikkaa.

### 2.1 Aurinkokennojen toimintaperiaate

Aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista, jotka tuottavat sähköä auringonsäteilystä. Tässä luvussa käsitellään aurinkokennojen toimintaperiaatetta, sitä miten kennot on valmistettu ja miten niiden tuottama teho määräytyy.

#### 2.1.1 Sähkömagneettinen säteily ja valosähköinen ilmiö

Auringossa tapahtuvan fuusioreaktion seurauksena sen lämpötila on hyvin korkea, pinnalta noin 5800 K. Näin suuri lämpötila tuottaa sähkömagneettista säteilyä, jonka spektri jakautuu ultraviolettisäteilyn ja lämpösäteilyn välille. Sähkömagneettinen säteily on aaltoliikettä, jossa sähkö- ja magneettikentät värähtelevät sinimuotoisesti poikittain etenemissuuntaan nähden ja kohtisuoraan toisiinsa nähden.

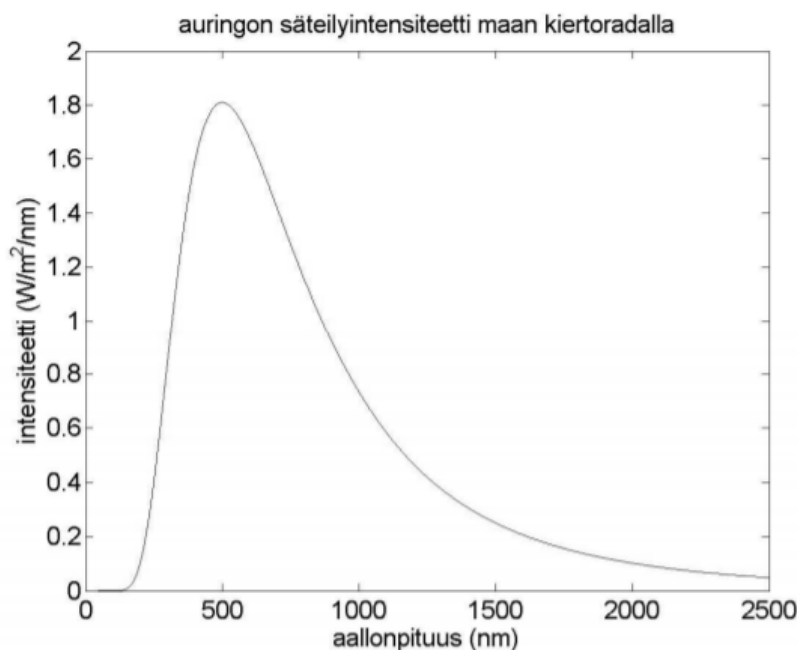
Sähkömagneettisen säteilyn energia on kvantittunutta, eli se voi saada ainoastaan kvantin, tässä tapauksessa fotonin energian monikertoja. Fotonin energia  $E$  riippuu säteilyn aallonpituudesta kaavan 1 mukaisesti

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1),$$

jossa  $h$  on Plancin vakio,  $c$  valonnopeus tyhjiössä ja  $\lambda$  säteilyn aallonpituus

Kaavasta 1 nähdään, että säteilyn energia on sitä suurempaa, mitä pienempi säteilyn aallonpituus on. Maahan kulkeutuneesta säteilystä suurin osa on näkyvän valon sekä infrapuna- ja ultraviolettisäteilyn alueilla. Myös muita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksia säteilee maahan, mutta niiden säteilyintensiteetti on niin pientä, että niitä ei voida sähköntuotannossa tehokkaasti hyödyntää. Maahan

kulkeutuneen säteilyn intensiteettijakauma on esitetty kuviossa 1. (Inkinen, Manninen, Tuohi 2002)



KUVIO 1. Auringon säteilyintensiteettijakauma maan kiertoradalla (Kuva: Korpela, 2014)

### 2.1.2 Aurinkokennon rakenne

Perinteisten puolijohdeaurinkokennojen toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön ja puolijohteen pn-liitokseen. Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan fysikaalista ilmiötä, jossa sähkömagneettinen säteily ja varaukset vuorovaikuttavat keskenään. Käytännössä aurinkosähköjärjestelmässä tämä tarkoittaa sitä, että säteilyn energia kykenee irrottamaan atomeista elektroneja.

Aineet voidaan jaotella sähkönjohtavuuden mukaan johteisiin, eristeisiin sekä puolijohteisiin. Seuraavaksi käydään läpi aineiden fysikaalisia ominaisuuksia sähkönjohtavuuden kannalta sekä miksi aurinkokennoissa käytetään puolijohteita.

Kun elektroni on osa atomia, niin sillä on Bohrin atomimallin mukaan tietty määrä mahdollisia energiatiloja. Kun kiinteän aineen kiderakenteessa atomit vuorovaikuttavat keskenään, niin mahdolliset energiatilat levittäytyvät energiavöiksi. Aurinkokennon toiminnan kannalta oleelliset energiavyöt ovat valenssivyö ja

johtavuusvyö. Näistä ensimmäisellä elektronit ovat sidottuja kiderakenteen sidoksiin, mutta jälkimmäisellä elektronien energia riittää vapaaseen liikkumiseen kiderakenteessa. Johteissa energiavyöt ovat vain osittain täynnä, kun taas eristeissä ja puolijohteissa valenssivyö on lähtökohtaisesti täynnä ja johtavuusvyö tyhjä.

Puolijohteet ja eristeet eroavat siinä, että eristeillä johtavuusvyön alareunan ja valenssivyön yläreunan välinen energiaero on paljon suurempi kuin auringonsäteilyn fotoneilla. Tietyillä puolijohteilla puolestaan tämä energiaero on sellainen, että osalla auringonsäteilyn fotoneista on riittävästi energiaa elektronien virittämiseen valenssivyöltä johtavuusvyölle.

Aurinkokennot on valmistettu tietyistä puolijohdemateriaaleista, jolloin valosähköisen ilmiön ansiosta fotonin energia on riittävä virittämään elektronin. Useimmiten aurinkokennot on valmistettu piistä sen matalan hinnan ja sopivan energiaaukon takia. Piin matala hinta johtuu siitä, että sitä käytetään paljon elektroniikka- ja tietoliikenneteollisuudessa. Puhtaassa puolijohteessa virittyneet elektronit kuitenkin usein rekombinoituvat, eli palaavat takaisin alkuperäiseen energiatilaansa luovuttaen ylimääräisen energian lämpönä. Tämän takia aurinkokennoissa käytetään pn-liitosta.

Pn-liitos koostuu p- ja n- tyyppin puolijohteista. Piikenoissa n-tyypin puolijohdetta saadaan, kun piitä seostetaan fosforilla ja p-tyypin puolijohdetta, kun piitä seostetaan boorilla. Fosforissa on viisi elektronia uloimmalla elektronikuorella ja boorilla kolme, kun taas piillä niitä on neljä. N-tyypin puolijohteessa on siis vapaita elektroneja ja p-tyypissä elektroniaukkoja. Vapaat elektronit ja elektroniaukot toimivat varauksenkuljettajina. Tavallaan tämä tarkoittaa sitä, että n-tyypissä on ylimäärää elektroneista ja p-tyypissä elektronivajetta.

Kun p- ja n-tyypin puolijohteet yhdistetään, niiden rajapinnalla alkaa tapahtua rekombinaatiota. N-tyypin vapaat elektronit täyttävät p-tyypin aukkoja, jolloin rajapintaan syntyy tyhjennysalue, jossa ei ole varauksenkuljettajia. Tyhjennysalueen reunat varautuvat sähköisesti, koska elektroneita on siirtynyt n-puolta p-puolelle. Tyhjennysalueen n-puoli varautuu positiivisesti, koska sieltä on lähtenyt elektroneja. Vastaavasti tyhjennysalueen p-puoli varautuu negatiivisesti, koska sinne on

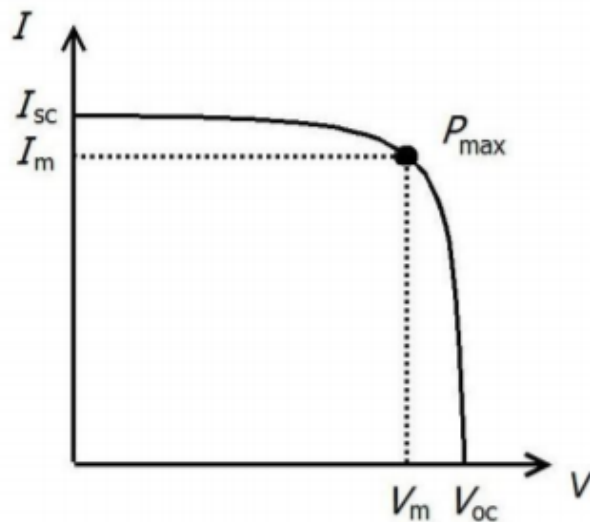
tullut elektroneja n-puolelta. Varusero muodostaa tyhjennysalueelle sähkökentän. Tämä sähkökenttä tarjoaa aurinkokennon toiminnan kannalta välttämättömän rakenteen, sillä kun fotonit absorboituvat tyhjennysalueessa, sähkökenttä aiheuttaa virittyneisiin elektroneihin voimavaikutuksen, joka siirtää ne n-puolelle, josta ne voivat siirtyä ulkoista piiriä pitkin p-puolelle. Sähkövirransuunta on elektronien liikettä vastaan, joten virta kulkee p-puolelta n-puolelle. Aurinkokennossa tyhjennysalue pyritään toteuttamaan mahdollisimman laajana, jotta kaikkialla kennossa virittyvät elektronit ovat sähkökentän vaikutuksen alaisia. (Korpela, 2014).

### **2.1.3 Aurinkokennon virta-jännitekäyrä**

Valmistaja yleensä ilmoittaa aurinkopaneeleista muun muassa sen oikosulkuvirran ja tyhjäkäyntijännitteen. Tyhjäkäynnissä napojen välille syntyy jännite, kun virittyneet ja tyhjennysalueen erottelemat varaukset eivät pääse ulos kennosta. Tämä jännite heikentää tyhjennysalueen sähkökentän voimakkuutta. Kun sähkökenttä on niin heikko, ettei se enää pysty erottelemaan elektroneja, niin napojen välillä on silloin maksijännite eli tyhjäkäyntijännite.

Oikosulussa napojen välinen jännite on nolla. Tällöin tyhjennysalueen sähkökenttä on maksimiarvossaan. Näin ollen oikosulkuvirta on kaikki virittyneet ja tyhjennysalueen erottelemat elektronit tietyissä olosuhteissa aikayksikköä kohden.

Valmistaja myös usein ilmoittaa maksimitehopisteen jännitteen ja virran. Jos nämä arvot asettaa virta-jännitekuvaajalle, saadaan kuvion 2 mukainen virta-jännitekäyrä.



KUVIO 2. Aurinkokennon virta-jännitekäyrä. (kuva: Korpela, 2014)

Aurinkopaneelin tuottama teho on sen jännitteen ja virran tulo. Teho on suurimmillaan virta-jännitekäyrän maksimitehopisteessä.

## 2.2 Aurinkokennon toiminnan riippuvuus ulkoisista tekijöistä

Aurinkopaneelin tuottama teho riippuu suuresti ulkoisista olosuhteista. Valmistajien antamat tekniset tiedot on usein ilmoitettu standardiolosuhteissa. Nämä sisältävät ilmamassan, säteilyintensiteetin sekä kennolämpötilan. Ilmamassa on kerroin sille matkalle, jonka auringonsäteily on matkannut ilmakehässä suhteessa ilmakehän paksuuteen. Standardiolosuhteiden arvot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Aurinkokennojen standardiolosuhteet

Ilmamassa	AM 1.5
Säteilyintensiteetti	1000 W/m <sup>2</sup>
Kennolämpötila	25 °C

Suurimpana tekijänä aurinkopaneelin tuottamaan tehoon on sen saama säteilyintensiteetti. Mitä suurempi säteilyintensiteetti paneeliin kohdistuu, sitä enemmän fotoneja on virittämässä elektroneja. Tästä syystä kennon oikosulkuvirta kasvaa lineaarisesti säteilyintensiteetin kasvaessa. Myös kennon tyhjäkäyntijännite kasvaa, mutta vain lievästi.

Lämpötila vaikuttaa aurinkokennoon siten, että tyhjäkäyntijännite laskee huomattavasti lämpötilan noustessa, sillä tyhjennysalueen sähkökenttä heikkenee, kun voimistuva lämpövärähtely aiheuttaa sähkökenttää kumoavien elektronien siirtymisen pn-liitoksen yli n-puolelle. Toisaalta lämpötilan nousu kasvattaa oikosulkuvirtaa hieman, sillä energiavöiden välinen energia pienenee. Tyhjäkäyntijännitteen lasku on kuitenkin paljon voimakkaampaa, joten lämpötilan nousu laskee aurinkokennon suorituskykyä.

Aurinkokennon suorituskyvyn kannalta parhaat olosuhteet olisivat sellaiset, että lämpötila olisi mahdollisimman alhainen, säteilyintensiteetti mahdollisimman korkea ja että ilmassa olisi yksi, eli aurinko paistaisi zenitissä. (Korpela. 2014)

## **2.3 Aurinkopaneelityypit**

Markkinoilla on saatavilla useita erityyppisiä aurinkopaneeleita. Eri paneelityypeillä saavutetaan erilaisia hyötysuhteita ja niiden hinnat vaihtelevat suuresti. Tässä luvussa käydään läpi erilaisia aurinkopaneelityyppejä ja niiden ominaisuuksia. Tarkempaa tuottavuuden vertailua käydään luvussa 4.

### **2.3.1 Piikenoaurinkopaneelit**

Suurin osa markkinoilla olevista aurinkopaneeleista on piikenoaurinkopaneeleita. Niitä kutsutaan myös ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeleiksi. Noin 90 % maailman aurinkosähkötuotannosta on toteutettu piikennopaneelilla. Nämä aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista, joita on kytketty sarjaan. Nykyaikaisissa aurinkopaneeleissa kennoja on 72 kappaletta.

Piikennot jaetaan yksi- ja monikidekennoiksi. Yksikidekennot on valmistettu puhtaasta piistä ja kennon rakenne on yhtä kokonaista kidettä. Monikidekennot puolestaan sisältävät monia jopa silminnähtäviä kiteitä. Yksikidekennot ovat hyötysuhteeltaan näistä hieman parempia, sillä kiteiden väliset rajapinnat lisäävät rekombinaatiota. Tosin uusissa paneeleissa erot hyötysuhteessa ovat maksimissaan vain muutamia prosenttiyksiköjä. Näiden paneelien välillä hyötysuhdetta tärkeämpi tekijä on pitkäikäisyys sekä valmistuksen laadukkuus.

### 2.3.2 Bifacial-aurinkopaneelit

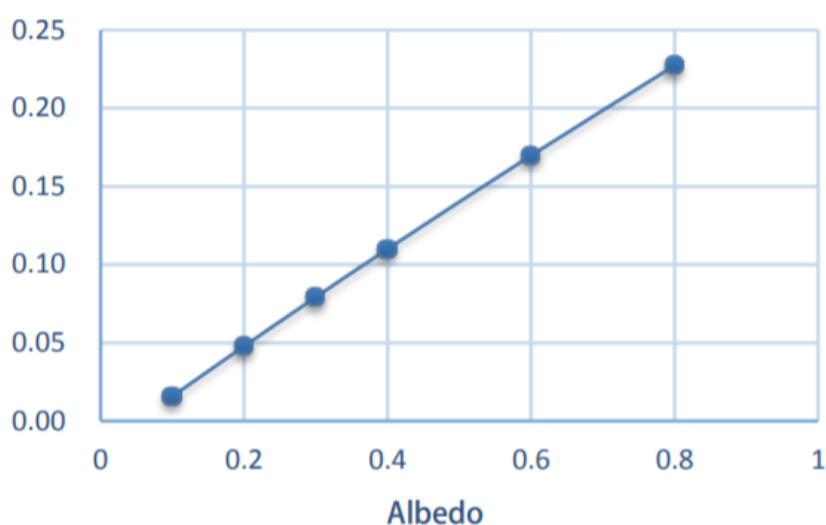
Bifacial-aurinkopaneeli eroaa piiaurinkopaneelistä siinä, että se pystyy hyödyntämään säteilyä molemmilta puolilta paneelia. Tällöin paneeli pystyy vastaanottamaan enemmän auringonsäteilyä. Näillä paneeleilla on parempi hyötysuhde verrattuna normaaliin piikennopaneeliin. Toisaalta bifacial-paneelit ovat kalliimpia. Paneelien tuotto riippuu siitä, että millainen albedo eli heijastavuus asennettujen paneelien takana olevalla pinnalla on. Taulukossa 2 on esitetty eri materiaalien tyypillisiä albedon arvoja.

TAULUKKO 2. Eri materiaalien albedo - arvoja

Materiaali	Albedo
Lumi	40 – 80 %
Vaalea hiekka	57 – 62 %
Hiekka	20 – 43 %
Maaperä	21 – 33 %
Sementti	20 – 40 %
Nurmi	10 – 25 %

Albedo vaikuttaa bifacialpaneelin tuottavuuteen kuvion 3 mukaisesti.

Bifacial Gain



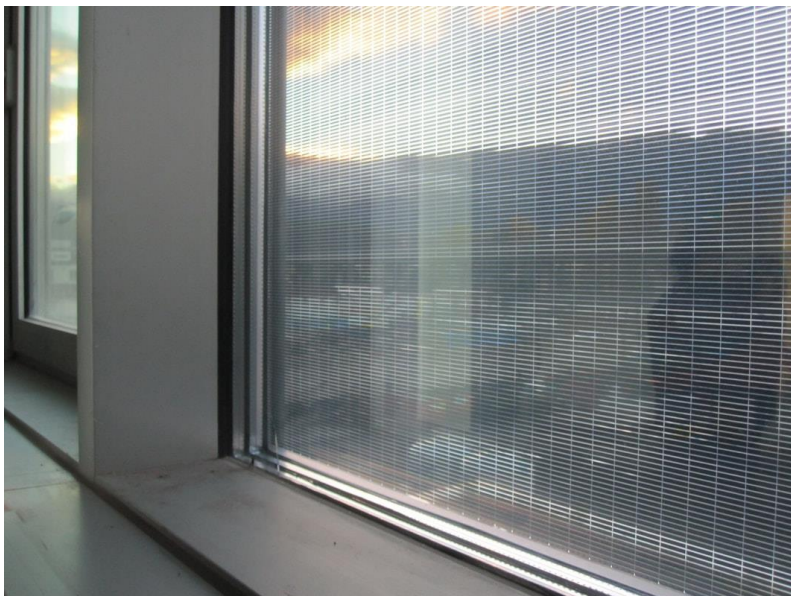
KUVIO 3. Albedon vaikutus bifacialaurinkopaneelin tuottavuuteen (kuva: Jinko solar)

### 2.3.3 Ohutkalvoaurinkopaneelit

Ohutkalvoaurinkopaneeleita kutsutaan monesti toisen sukupolven aurinkopaneeliksi. Ne on valmistettu suoran energia-aukon puolijohteesta, kun taas piikennourinkopaneelit epäsuoran energia-aukon puolijohteesta. Näiden ero on siinä, että suoran energia-aukon puolijohteissa valenssivyön maksimienergia ja johtavuusvyön minimienergia osuvat samalle elektronin liikemäärän arvolle. Elektronien liikemäärä on siis sopiva virittymiselle, jolloin fotonien absorboituminen tapahtuu todennäköisemmin lyhyemmällä matkalla. Tästä syystä suoran energia-aukon puolijohteesta voidaan valmistaa paksuudeltaan vain mikrometrien suuruusluokkaa olevia ohutkalvokennoja. Pii on epäsuoran energia-aukon puolijohde, ja siksi kiteisen piikennon minimipaksuus on sadan mikrometrin suuruusluokassa, jolloin ohutkalvokennojen valmistaminen ei ole mahdollista.

Ohutkalvoaurinkokennoja on markkinoilla kolmea tyyppiä: amorfina pii ( $a\text{-Si}$ ), kadmiumtelluridi ( $\text{CdTe}$ ) sekä kupari-indium-gallium-selenidi (CIGS tai CIS). Kun käytetään amorfista piitä, kennosta saadaan läpinäkyvä. Tästä syystä näistä kennoista tehdyt paneelit sopivat loistavasti julkisivuihin, kun niitä voidaan käyttää esimerkiksi ikkunoissa, kuten kuvassa 1. Näiden paneelien hyötysuhteet ovat kuitenkin huomattavasti matalammat verrattuna muihin paneelityyppeihin, sillä ne eivät pysty hyödyntämään näkyvän valon aallonpituusalueella olevia fotoneja. CIGS-paneelit voidaan puolestaan integroida esimerkiksi kattorakenteseen. Suomalaisista yrityksistä esimerkiksi Virte Solar toimittaa tällaisia järjestelmiä.





KUVA 1. Amorfinen piipaneeli integroituna ikkunaan (kuva: Ralos)

Toistaiseksi käytetyin ohutkalvokennotyyppi kadmiumtelluridi. Sen käyttö on kuitenkin vähentymässä kadmiumin myrkyllisyyden takia. Tulevaisuudessa CIGS-kennoista tulee todennäköisesti käytetyin ohutkalvokenno.

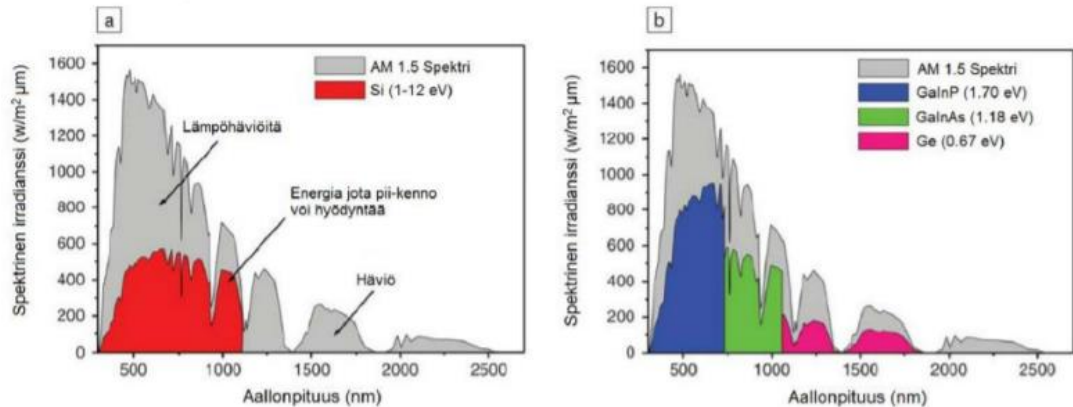
### 2.3.4 Half cut -paneelit

Suhteellisen uutena teknologiana markkinoille on tullut half cut -paneelit. Ne eroavat normaaleista aurinkopaneeleista siinä, että niiden kennot on halkaistu kahtia. Tämä mahdollistaa sen, että toinen puoli paneelista voi toimia nimellisellä teholla, vaikka toinen puoli paneelista olisi varjostuneena. Perinteisissä aurinkopaneeleissa koko paneelin teho tippuu merkittävästi, jos jokin osa paneelista varjostuu. Half cut -paneeleissa kennot voidaan sijoittaa lähemmäs toisiaan, jolloin sama teho saavutetaan pienemmällä paneelikoolla. (Pickerel, 2018.)

### 2.3.5 Moniliitosaurinkokennot

Moniliitosaurinkokennot koostuvat monista eri materiaaleista tehdyistä pn-liitoksista. Jokainen pn-liitos tuottaa sähköä omalla aallonpituusalueellaan. Päällimmäinen kerros absorboi suurienergiset fotonit. Seuraavassa kerroksessa energia-aukko on hieman pienempi, jolloin absorboidaan seuraavaksi suurienergiset fotonit. Tällainen mahdollistaa huomattavasti korkeamman hyötysuhteen normaaleihin aurinkokennoihin nähden, sillä esimerkiksi piikennoissa suurin

hyötysuhdetta laskeva tekijä on se, että iso osa suurienergisiempien fotonien energiasta muuttuu lämmöksi. Toisaalta moniliitosaurinkokennot ovat huomattavasti kalliimpia. Hyöty saadaan siinä, että saman tehon saavuttaakseen tarvitaan pienempi pinta-ala. Moniliitosaurinkokennoja käytetään lähinnä keskittävässä aurinkovoimaloissa sekä puolustus- ja avaruusteollisuudessa (Ala-Myllymäki, 2016). Piikennon ja moniliitoskennon absorboiman säteilyn erot ovat nähtävissä kuvassa 2.



KUVA 2. Piikidekennon (vas.) ja moniliitoskennon (oik.) absorboima säteilyn spektri (kuva: Ala-Myllymäki)

### 2.3.6 Aurinkokennojen hyötysuhteet

Aurinkokennojen hyötysuhteet ilmoitetaan standardiolosuhteissa. Yksiliitoskennon teoreettinen maksimihyötysuhde, eli Shockley – Queisserin raja on 30 %. Tämä pätee piikidekennon energia-aukolle 1,1 eV (Shockley, Queisser, 1960). Ihanteellisella energia-aukolla 1,34 eV raja on 33,17 % (Rühle, 2015).

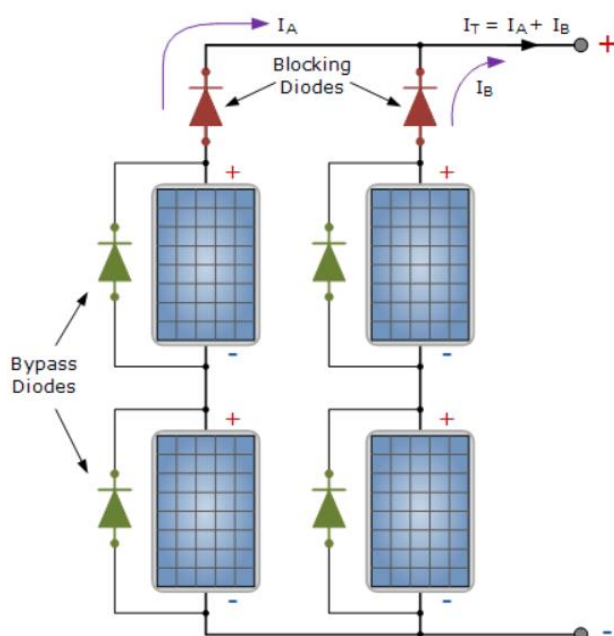
Moniliitoskennot mahdollistavat piikenoja suuremmat hyötysuhteet. Niillä suurin teoreettinen hyötysuhde on 86,6 %. Suurin kokeellinen saavutettu hyötysuhde vuonna 2019 moniliitosaurinkokennolla on 47,1 %. Taulukossa 3 on esitetty suurimmat kokeelliset hyötysuhteet markkinoilla käytetyille aurinkokennotyypeille vuonna 2019. (Kopidakis, 2019).

TAULUKKO 3. Aurinkokennotyyppien suurimmat kokeelliset hyötysuhteet

Kenno	Hyötysuhde (%)
M-Si	27,6
P-Si	22,8
CIGS	23,4
CdTe	22,1
A-Si	14,0

## 2.4 Ohitus- ja estodiodit

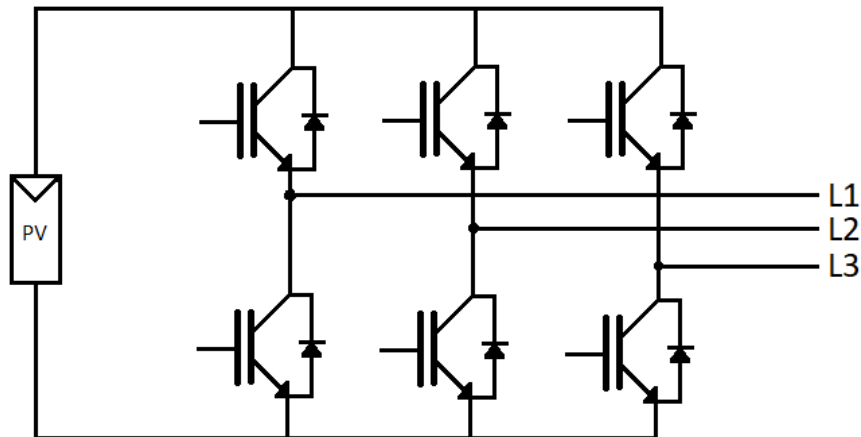
Aurinkopaneeleissa käytetään ohitus- ja estodiodia tuottavuuden parantamiseksi. Ohitusdioiden tehtävä on ohjata muiden paneelien virta paneelin ohi, jos paneeli on vahingoittunut tai varjossa. Tällöin vältetään ylimääräiseltä lämpenemiseltä, joka laskee kennojen hyötysuhdetta. Estodiodien tehtävä on puolestaan estää virran kulkeminen väärään suuntaan. Näitä diodeja käytetään paneelin sisäisesti sekä kytkettäessä monia paneeleita array -tyyppisesti. Diodeja voidaan käyttää kaikilla aurinkopaneelityypeillä. Diodien kytkennät on esitetty kuvassa 3.



KUVA 3. Ohitusdiodit (vihreät) ja estodiodit (punaiset) aurinkopaneeleiden string-kytkennässä (kuva: electronics-tutorials.ws)

## 2.5 Invertterit

Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, kun taas sähköverkko toimii vaihtosähköllä. Tästä syystä tasasähkö on vaihtosuunnattava invertterillä eli vaihtosuuntaajalla. Invertterit toimivat niin, että tasasähköpiirin plus- ja miinusnapojen välille kytketään kuusi IGBT-transistoria kuvan 4 mukaisesti.

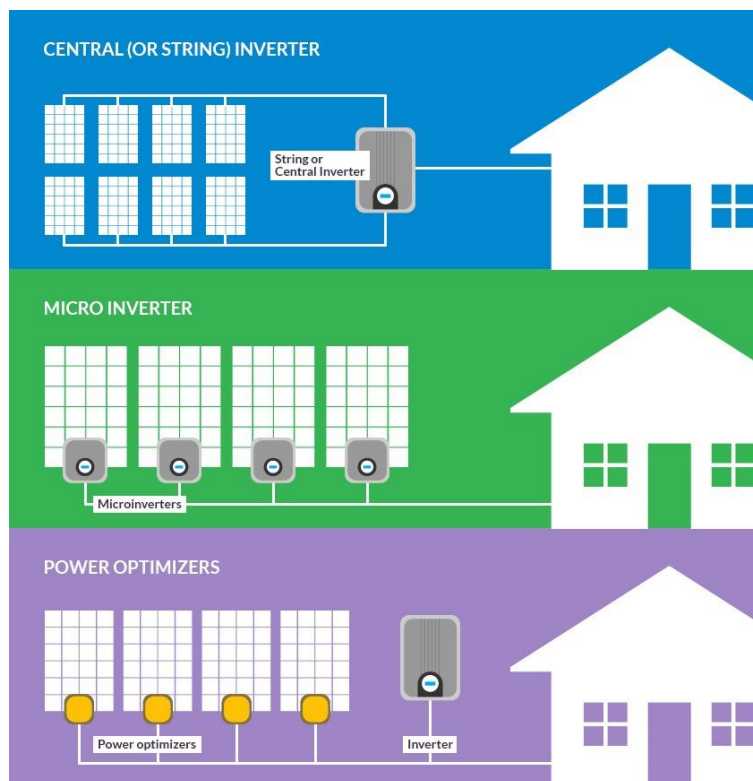


KUVA 4. Invertterin kytkentäkaavio

Transistoreita ohjataan johtaviksi ja ei johtaviksi niin, että ulostuloon tulee kolmi-vaiheista muistuttavaa jännitettä. Invertterien ohjaus tapahtuu pwm-signaaleilla. Pwm eli pulssinleveysmodulaatio on modulointitapa, jossa jännitepulssein leveyttä muutetaan niin, että jännite on keskiarvoltaan halutun suuruinen halutulla ajanhetkellä. Kun ulostuloon kytketään suodin, niin virrasta ja jännitteestä saadaan sinimuotoista. Vaihtosähkön lisäksi invertterin on muutettava jännitetaso sopivaksi. Tämä on helppo toteuttaa muuntajalla sen jälkeen, kun vaihtosuuntaus on tehty. Jännitteen nostaminen voidaan toteuttaa myös tasajännitepuolella hakkurin avulla. Monet uudet invertterit toteutetaan ilman muuntajaa, sillä niissä on pääsääntöisesti parempi hyötysuhde.

Invertterit voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: string-invertterit ja mikroinvertterit. String-invertteriin kytketään useita aurinkopaneeleita, jotka ovat keskenään rinnan ja/tai sarjassa. Mikroinvertterit kytketään yksittäisen aurinkopaneelin napoihin. Lisäksi on olemassa tehon optimointijärjestelmiä, jossa jokaiseen paneeliin kytketään optimoija, mutta vaihtosuuntaus toteutetaan string-invertterin tavoin. Optimoijat ovat tasasähkökonverttereita, joihin on sisällytetty MPPT-säädin.

MPPT:tä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Näiden kolmen järjestelmän periaatteelliset kytkennät on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Eri invertterijärjestelmien toiminta (kuva: letsgosolar.com)

Mikroinvertterien herätejännite on muutamia kymmeniä voltteja, kun taas stringinverttereillä se on useita satoja voltteja. Tämä tarkoittaa teoriassa, sitä että mikroinvertteri tuottaa enemmän tehoa aamu- ja ilta-aikaan, koska silloin paneelien tuottama jännite on pienempi.

### 2.5.1 MPPT

Vaihtelevien olosuhteiden takia aurinkokenno toimii harvoin maksitehopisteeseen ilman erillistä säädintä. Maksimitehopisteen paikka virta-jännitekäyrällä vaihtelee olosuhteiden mukaan. Jos esimerkiksi pilvi varjostaa paneelin, niin maksimitehopiste ei ole samassa paikassa kuin pilvettömältä taivaalta paistavan auringon tapauksessa.

Maksimitehopisteessä pystytään pysymään MPPT (maximum power point tracking) -menetelmällä. MPPT voi olla erillinen laite, tai se voi olla sisällytetty esimerkiksi invertteriin. MPPT:lle on useita eri algoritmeja, jotka toimivat hieman

eri tavoilla. Algoritmit ovat yleensä liikesalaisuuksia, eivätkä valmistajat normaalisti ilmoita käyttämäänsä menetelmää. Seuraavassa luvussa käsitellään yleisimmin käytettyjä algoritmeja teorian tasolla.

### **2.5.2 Vakiojännitemenetelmä**

Jos oletetaan, että ainoastaan paneelin jännitteellä on vaikutusta tehoon, niin maksimitehopistettä vastaava jännite voidaan laskea. Vakiojännitemenetelmällä MPPT pyrkii pitämään jännitteen aina tässä arvossa. Tällä menetelmällä ei päästä todelliseen maksimitehopisteeseen vaan sille pyritään löytämään mahdollisimman hyvä arvio. Tietyissä olosuhteissa vakiojännitemenetelmä on parempi kuin monimutkaisemmat menetelmät, ja siksi tätä yksinkertaista menetelmää käytetään usein yhdessä muiden menetelmien kanssa.

Vakiojännitemenetelmä on hyvin yksinkertainen, sillä algoritmi tarvitsee mittaus-tuloksena ainoastaan paneelin jännitteen. Menetelmä vaatii toimiakseen kunnolla alueen maantieteellistä dataa, jotta sopiva vakiojännite voidaan laskea. Datan saaminen on kuitenkin melko helppoa.

### **2.5.3 Oikosulkumenetelmä**

Maksimitehopisteen virta on verrannollinen jollain kertoimella oikosulkuvirtaan kyseisissä olosuhteissa. Oikosulkuvirta voidaan mitata, kun paneelin navat oikosuljetaan hetkellisesti. Tällä ajanhetkellä paneeli ei kuitenkaan voi tuottaa tehoa, sillä sen napojen välillä ei ole jännitettä. Tällöin järjestelmän hyötysuhde pienenee. Tyypillinen kerroin maksimitehopisteen virran ja oikosulkuvirran välillä on noin 0,92.

### **2.5.4 Tyhjäkäyntijännitemenetelmä**

Tyhjäkäyntijännitemenetelmä toimii vastaavalla periaatteella, kuin oikosulkumenetelmä. Erona on se, että hetkellinen oikosulku korvataan hetkellisellä tyhjäkäynnillä ja virran sijasta mitataan jännitettä. Tässäkin tapauksessa mittauksen aikana paneeli ei voi tuottaa tehoa, koska virralla ei ole kulkureittiä. Tyypillinen

kerroin maksimitehopisteen jännitteen ja tyhjäkäyntijännitteen välillä on noin 0,76.

### 2.5.5 Naapuruushakumenetelmä

Naapuruushakumenetelmä (perturb and observe, hill climbing) toimii niin, että jännitteelle tai virralle tehdään muutos ja katsotaan, että miten teho muuttui. Ongelmana tässä menetelmässä on se, että jokaisella toimintahetkellä tehdään muutos. Jos maksimitehopiste on jo saavutettu, niin tämä aiheuttaa värähtelyä maksimitehopisteen ympärillä.

### 2.5.6 Vähittäiskonduktanssimenetelmä

Vähittäiskonduktanssimenetelmä perustuu siihen, että maksimitehopisteessä pätee kaava 2

$$\left(\frac{dI}{dU}\right) + \left(\frac{I}{U}\right) = 0, \quad (2)$$

jossa  $I$  on paneelin hetkellinen virta ja  $U$  on paneelin hetkellinen jännite.

Jos kaavan 2 vasen puoli on positiivinen, niin paneelin jännite on liian pieni ja jos se on negatiivinen, niin jännite on liian suuri. Tämä menetelmä pystyy löytämään maksimitehopisteen tarkan paikan, eikä värähtelyä pääse esiintymään. Toisaalta algoritmi vaatii hieman enemmän laskentatehoa prosessorilta, joten hinta on hieman kalliimpi.

### 2.5.7 Lämpötilamenetelmä

Kuten luvussa 2.2 mainittiin, niin paneelin tyhjäkäyntijännite riippuu suurimmaksi osaksi lämpötilasta. Lämpötilamenetelmässä algoritmi laskee lämpötilamittauksen perusteella tyhjäkäyntijännitteen, jonka jälkeen voidaan löytää sopiva jännite paneelille. Tyhjäkäyntijännite voidaan mallintaa kaavalla 3

$$U_0 \cong U_{stc} + \frac{dU_0}{dT} \cdot (T - T_{stc}), \quad (3)$$

jossa  $U_{stc}$  on tyhjäkäyntijännite standardiolosuhteissa,  $(dU_0/dT)$  on paneelin lämpötilagradientti ja  $T_{stc}$  kennon lämpötila standardiolosuhteissa.

Kun kaavalla 3. on laskettu tyhjäkäyntijännite, niin tyhjäkäyntijännitemenetelmällä voidaan löytää sopiva paneelin jännite. Etuna tässä menetelmässä on parempi hyötysuhde, sillä tyhjäkäyntijännitettä ei tarvitse mitata, jolloin välttyään tuotannon katkeamiselta. Toisaalta menetelmä vaatii enemmän laskutehoa, kuin yksinkertaisemmat menetelmät. (Faranda, Leva, 2008)



### 3 JÄRJESTELMIEN VERTAILU

Aurinkosähköjärjestelmien vertailua tehtiin hankkimalla tietoa todellisista aurinkosähköjärjestelmistä ja niiden energiantuotannosta. Tutkimuksessa vertailtiin eri invertterijärjestelmien sähköntuotantoa Suomessa. Lisäksi vertailtiin eri invertterivalmistajien painotettuja hyötysuhteita. Nämä valmistajat on esitelty taulukossa 4. Tässä luvussa käsitellään, miten vertailu on tehty ja millaisia lopputuloksia saatiin.

TAULUKKO 4. Vertailussa olevat invertterivalmistajat

Valmistaja	Invertterityyppi
Enphase	Mikro
Fronius	String
Hoymiles	Mikro
SMA	String, (optimointi)
Solaredge	Optimointi

#### 3.1 Tuottavuuksien vertailu

Aurinkosähköjärjestelmien tuottavuuksia vertailtiin eri valmistajien portaalien tietojen perusteella. Tiedot haettiin SMA:n, Solaredgen ja Hoymilesin portaaleista. Näin saatiin vertailtua eri invertterityyppien tuottavuutta. Vertailuun valittiin viisi SMA:n, neljän Solaredgen ja kolme Hoymilesin invertterillä varustettua järjestelmää. SMA:n järjestelmistä kolmessa oli yksikide- ja kahdessa monikidepaneeleita. Solaredgellä oli kaksi monikidepaneeleilla, yksi yksikidepaneeleilla sekä yksi CIGS – paneelilla varustettu järjestelmä. Hoymilesin järjestelmissä kaikki paneelit olivat monikidepaneeleita. Kaikki järjestelmät sijaitsivat Etelä – Suomessa. Järjestelmien tiedot on esitetty liitteessä 1.

Portaaleista haettiin järjestelmien nimellistehot ja niiden vuoden 2019 aikana tuotettu energia. Lisäksi haettiin paneelien asennussuunta ja sijainti, joiden avulla saatiin paneelisiin kohdistuva säteily vuoden aikana.

Säteilyintensiteetti vuoden aikana saatiin syöttämällä paneeleiden sijainti ja kallistuskulmat Pvgis – ohjelmaan. Kyseessä on Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen ohjelma, joka perustuu Cm saf – ilmastomonitorointijärjestelmään. Tuloksena saatiin pinnan säteilyintensiteetti normaalivuoden aikana.

Näiden tietojen perusteella voitiin laskea PR (Performance Ratio) - luku. PR:n avulla voidaan vertailla eri tehoisia järjestelmiä eri puolelta maapalloa, sillä se suhteuttaa tuotetun energian paneeleiden saamaan säteilyintensiteettiin. PR lasketaan kaavan 4 mukaisesti.

$$PR = \frac{W \cdot 1000 \frac{W}{m^2}}{E \cdot P_N} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

jossa  $W$  on tuotettu sähköteho,  $E$  pinnan säteilyintensiteetti ja  $P_N$  järjestelmän nimellisteho.

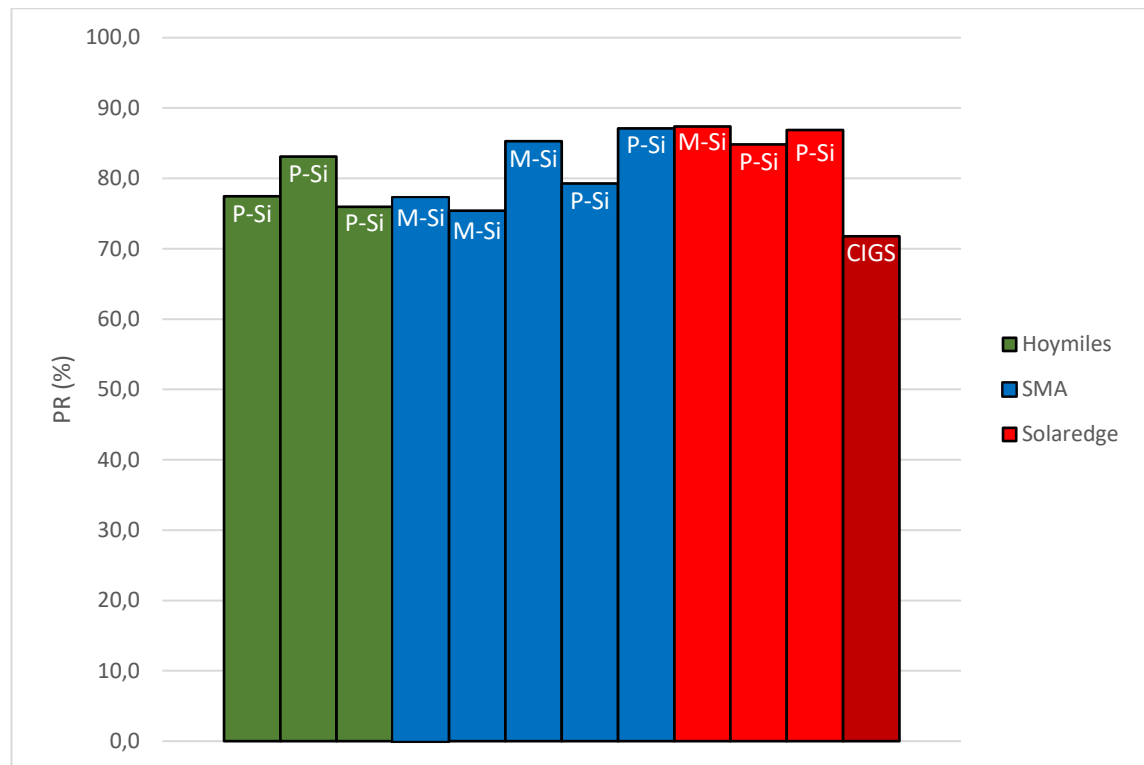
PR - luku kertoo sen, että kuinka monta prosenttia mahdollisesta energiasta järjestelmä tuottaa vuoden aikana. 100 % tarkoittaa sitä, että järjestelmä toimii ideaalisesti. Tätä arvoa ei voida todellisuudessa saavuttaa, sillä osa energiasta kuluu aina häviöihin. Sadasta prosentista puuttuva osuus kertoo suoraan häviöiden määrän.

Pvgis – ohjelmasta saatu säteilyintensiteetti on keskimääräinen vuoden aikana saatu säteilyintensiteetti kyseisellä alueella. Todellinen vuoden aikana esiintynyt säteilyintensiteetti on todennäköisesti muuta kuin ohjelman antama keskimääräinen säteilyintensiteetti, mikä lisää virhettä. Lisäksi ohjelma ei ota huomioon muista kuin ilmastollisista syistä, esimerkiksi puista tai rakennuksista johtuvia varjoja.

Varjojen arvoitiin vaikuttavan kahteen Hoymilesin järjestelmään siten, että paneelit varjostuivat 10 % ajasta. Varjostumisen aikana oletettiin, että intensiteetti laskee yhtä paljon, kuin pilven vaikutuksesta, joka on tutkimusten mukaan 80 %. (Valkealahti, 2016.) Varjot eivät kuitenkaan vaikuta pilvisellä säällä, sillä säteily on jo valmiiksi diffuusia. Näin ollen varjostumisajan oletettiin olevan 5 %. Täten kokonaisintensiteetti laski 4 %. Tämä otettiin huomioon PR - lukua laskettaessa.

Muissa järjestelmissä varjostumista joko ei tapahtunut tai sitä ei voitu määrittää johtuen järjestelmän tarkan sijainnin puutteesta.

Järjestelmien vertailun tulokset on esitetty kuviossa 4.



KUVIO 4. Järjestelmien PR - luvut

Tuloksista nähdään, että tasaisesti parhaiten pärjäsivät Solaredgen järjestelmät lukuunottamatta CIGS -paneeleilla toteutettua järjestelmää. CIGS – paneeleilla on yleisesti heikommat hyötysuhteet verrattuna piikidepaneeleihin, joka osaltaan selittää heikompa PR - lukua.

SMA:n kaksi järjestelmää pääsivät samalle tasolle Solaredgen kanssa. Näistä järjestelmistä ei ole tiedossa, että onko niissä käytetty optimoijia vai ei, mutta selkeästi parempi tulos muihin SMA:n järjestelmiin nähden voisi kertoa tästä. Varmuutta tästä ei kuitenkaan ole saatavilla.

Hoymilesin järjestelmät pärjäsivät hieman odotettua huonommin päästen vain SMA:n heikoimmin pärjänneiden järjestelmien tasolle. Monissa aikaisemmissa tutkimuksissa mikroinvertterit ovat pärjänneet stringinvertteritä paremmin, mutta tässä tutkimuksessa tulos oli toinen.

Järjestelmistä seitsemän oli monikidepaneeleja ja neljä yksikidepaneeleja. Tulosten perusteella näiden paneelityyppien välillä ei ole havaittavissa eroavaisuuksia PR – luvussa. Esimerkiksi SMA:n paremmin pärjänneistä järjestelmistä toinen oli yksi- ja toinen monikidepaneeli. Paneelityyppinä vertailemalla voidaan ainoastaan todeta, että ohutkalvopaneeleja edustava CIGS-paneeli pärjasi piikidepaneeleja heikommin.

### 3.2 Hyötysuhteiden vertailu

Invertterien toimintaan vaikuttaa suuresti, millä kuorma-asteella ne toimivat. Tehoarvot vaihtelevat paljon aurinkosähköjärjestelmissä. Tästä syistä on kehitetty painotettuja hyötysuhteen yksiköitä, jotta invertterien vertailu olisi helpompaa. Valmistajat yleisimmin käyttävät euro- ja cec-hyötysuhteita.

Euro-hyötysuhde on Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen laatima ja se perustuu keskimääräisiin Keski-Euroopan säteilymääriin. Euro-hyötysuhde lasketaan kaavalla 5

$$\eta = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \cdot \eta_{100\%}, \quad (5)$$

jossa  $\eta_{(5\%)}$  on hyötysuhde, kun teho on 5% nimellisestä jne.

Toinen yleisesti käytetty painotettu hyötysuhdeyksikkö on cec-hyötysuhde. Se on Kalifornian energiakomission laatima yksikkö, joka perustuu Lounais-Yhdysvaltojen säteilymääriin. Cec-hyötysuhde lasketaan kaavalla 6

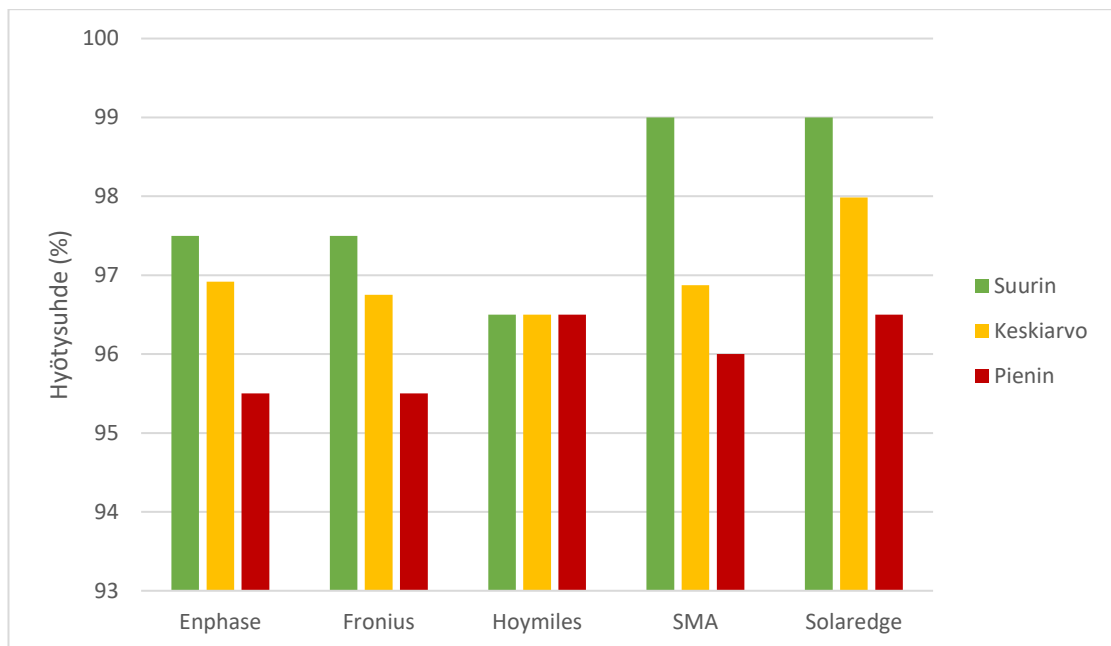
$$\eta = 0,04 \cdot \eta_{10\%} + 0,05 \cdot \eta_{20\%} + 0,12 \cdot \eta_{30\%} + 0,21 \cdot \eta_{50\%} + 0,53 \cdot \eta_{75\%} + 0,05 \cdot \eta_{100\%}, \quad (6)$$

jossa  $\eta_{(10\%)}$  on hyötysuhde, kun teho on 10% nimellisestä jne.

Työssä vertailtiin valittujen invertterivalmistajien tuotteiden cec – hyötysuhteita. Tiedot haettiin gosolarcalifornia – sivustolta, joka on Kalifornian energiakomission

ja Kalifornian julkisen palvelulaitoksen ylläpitämä. Vertailussa haettiin valmistajien suurin ja pienin hyötysuhde, sekä laskettiin keskimääräinen hyötysuhde. Tämän lisäksi valmistajilta valittiin yksi malli tarkempaan tarkasteluun. Vertailuun valittiin malleja, joita oli käytetty luvun 3.1 järjestelmissä. Koska kaikki valmistajat eivät valmista suuren teholuokan inverttereitä, niin vertailuun valittiin inverttereitä, joiden huipputeho oli alle 15 kWp.

Vertailun, joka sisälsi kaikki valmistajan mallit, tulokset on esitetty kuviossa 5.

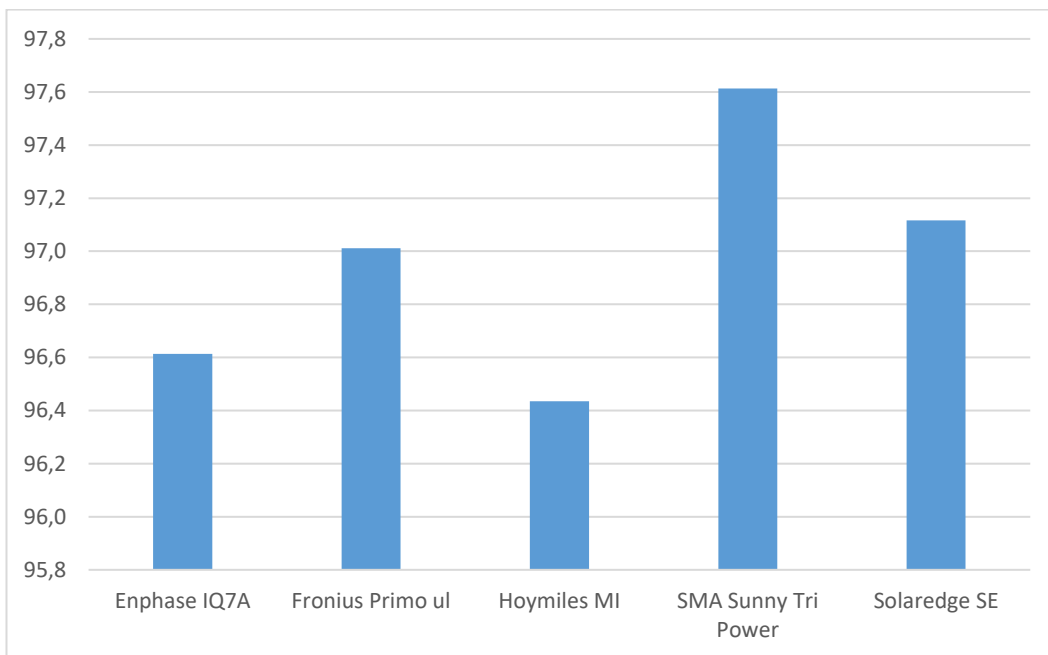


KUVIO 5. Invertterien cec - hyötysuhteet valmistajittain

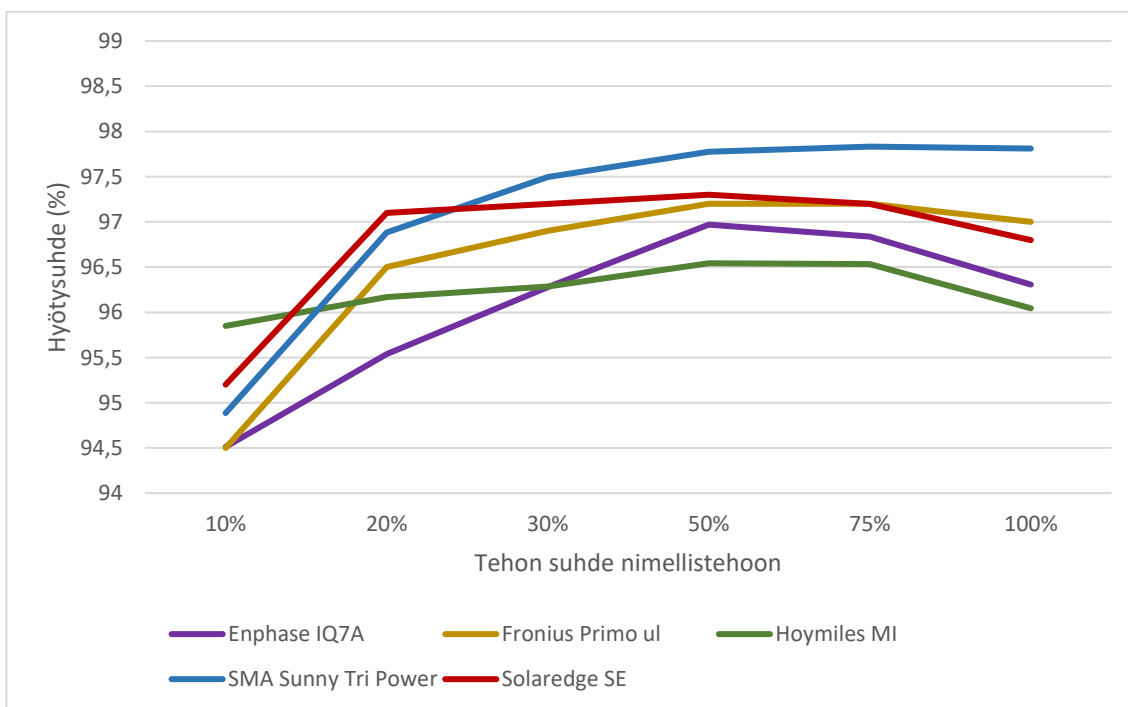
Tuloksista nähdään, että monilla valmistajilla ero parhaimman ja huonoimman hyötysuhteen invertterien välillä on selkeä. Valmistajista ainoastaan Hoymilesilla on tarjolla samaa hyötysuhdetta kaikille inverttereille. Invertterien nimellistehot vaihtelevat suuresti. Pienimmät mikroinvertterit ovat nimellisteholtaan vain paria sataa wattia, kun taas suurimmat invertterikeskukset ovat useita megawatteja. Tämän takia on myös syytä vertailla tarkemmin pienemmän tehoasteen inverttereitä.

Tarkempaan vertailuun valitut invertterimallit olivat Enphase IQ7A, Fronius Primo UL, Hoymiles MI, SMA Sunny Tri Power ja Solaredge SE. Invertterimalleja on saatavilla useilla eri tehoarvoilla ja niiden hyötysuhteet vaihtelivat nimellistehon

mukaan. Yleisesti suuritehoisten invertterien hyötysuhde on parempi kuin pieni-  
tehoisten. Tässä vertailussa kaikki invertterit olivat alle 15 kW, jotta vertailu olisi  
järkevää. Jos tietokannasta ei löytynyt samantehoista mallia kuin luvun 3.1 ver-  
tailussa, valittiin saman sarjan invertteri mahdollisimman lähellä olevalla tehoi-  
mauksella. Tulokset on esitetty kuvioissa 6. ja 7.



KUVIO 6. Valittujen invertterisarjojen cec – hyötysuhteet



KUVIO 7. Invertterien hyötysuhteet tehoasteen mukaan

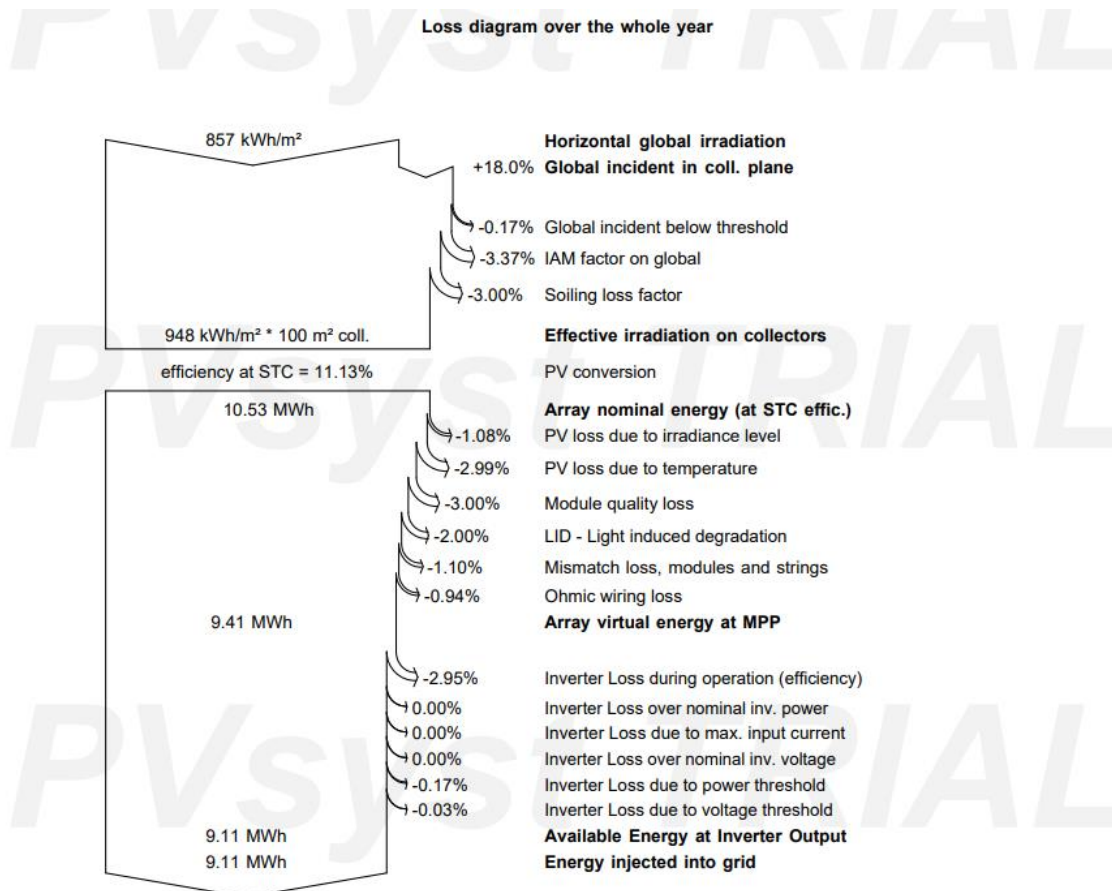
Näistä inverttereistä parhaiten pärjasi Solaredgen Sunny Tri Power – mallinen invertteri. Etenkin suuremmilla tehoilla se pärjasi huomattavasti kilpailijoitaan paremmin. Huonoin cec – hyötysuhde oli Hoymilesin invertterillä. Hoymilesin hyötysuhde oli kuitenkin vertailun tasaisin. 10 %:lla nimellistehosta hyötysuhde oli jopa vertailun paras. Kaikki invertterit noudattivat samanmuotoista käyrää, jossa hyötysuhde kasvaa tehon kasvaessa, mutta pienenee hieman, kun saavutetaan nimellisteho. Kokonaisuudessaan erot hyötysuhteissa ovat melko pieniä. Eroa suurimman ja pienimmän cec – hyötysuhteen välillä on vain 1,2 prosenttiyksikköä.

## 4 TUOTTAVUUDEN PARANTAMINEN

Tässä luvussa käsitellään asioita, joilla voidaan parantaa aurinkosähköjärjestelmän tuottavuutta. Tuottavuutta voidaan parantaa suunnitteluvaiheessa toimivien komponenttien valitsemisen lisäksi pienentämällä häviöitä ja tekemällä hyviä suunnitteluratkaisuja. Lisäksi luvussa käsitellään jo asennetun järjestelmän tuottavuuden ylläpitoa.

### 4.1 Häviöt

Yksi tapa parantaa tuottavuutta on vähentää järjestelmän häviöitä. Tätä varten häviöt ja niiden syyt on syytä tunnistaa. Tässä luvussa käydään läpi yleisimpiä aurinkosähköjärjestelmän häviöitä, mistä ne johtuvat ja miten niitä voidaan mallintaa sekä pienentää. Yhden esimerkkijärjestelmät simuloidut häviöt ovat esitetty kuviossa 8.



KUVIO 8. Esimerkkijärjestelmän simuloidut häviöt



#### 4.1.1 Ohmiset häviöt

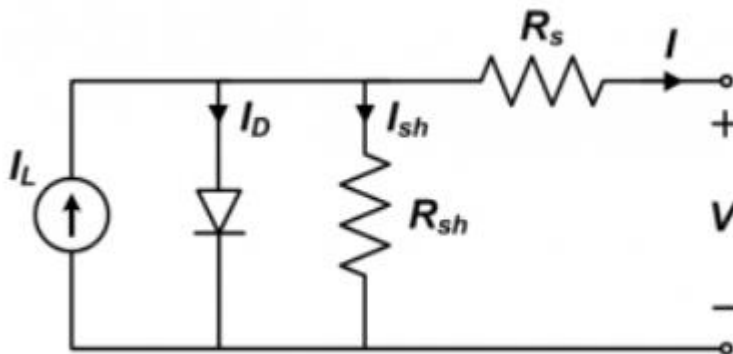
Aurinkosähköjärjestelmässä ohmisia häviöitä tapahtuu johtimissa, joilla paneelit on kytketty invertteriin, sekä paneelin ja invertterin sisäisten resistanssien takia. Resistanssin aiheuttama tehohäviö määräytyy kaavan 7 mukaan

$$P = I^2 \cdot R, \quad (7)$$

jossa  $P$  on sähköteho,  $I$  sähkövirta ja  $R$  resistanssi.

Kaavasta 7 nähdään, että häviöihin kuluva teho riippuu virrasta toisessa potenssissa. Virtaa dc – järjestelmässä voidaan vähentää nostamalla jännite korkeammaksi. Tällöin saattaa toisaalta esiintyä muun muassa PID – häviöitä, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.1.6.

Aurinkopaneelin sisäisiä häviöitä voidaan mallintaa diodimallilla. Diodimalli on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Diodimallin ekvivalenttipiiri (kuva: PVPMC)

Mallissa  $I_L$  on kennon tuottama sähkövirta ilman häviöitä,  $I_D$  diodin virta,  $I_{sh}$  shunttiresistanssin virta,  $R_{sh}$  shunttiresistanssin arvo,  $R_s$  sisäresistanssin arvo,  $I$  kennon tuottama virta häviöiden jälkeen ja  $V$  kennon jännite.

Diodimallin mukaan aurinkopaneelin häviöt riippuvat vahvasti paneelin saamasta säteilyintensiteetistä. Ekvivalenttipiirin virtalähteen tuottama virta on riippuvainen säteilyintensiteetistä ja hieman lämpötilasta, kuten luvussa 2.2 huomattiin. Sätei-

lyintensiteetti vaikuttaa lisäksi ekvivalenttipiirin shunttiresistanssin  $R_{sh}$  suuruuteen. Suuremmilla säteilyintensiteeteillä resistanssin arvo pienenee, mikä kasvattaa häviöitä. Sarjaresistanssin arvo riippuu virrasta toisessa potenssissa. Jos tämä arvo on liian suuri esimerkiksi valmistusvirheen takia, paneeli saattaa toimia paremmin heikossa säteilyssä verrattuna voimakkaaseen säteilyyn. Tällöin järjestelmän tuottavuus kärsii suuresti. Mallissa oleva diodi kasvattaa osaltaan häviöiden epälineaarisuutta, sillä diodissa tapahtuvat häviöt riippuvat sen kynnysjännitteestä. Lisäksi diodin estosuunnan saturaatiovirran suuruuteen vaikuttavat lämpötila ja käytetty aurinkopaneelityyppi.

Paneeleiden ja johtimien lisäksi ohmisia häviöitä tapahtuu myös inverttereissä. Erityisesti tehoelektronikkakomponentit ja muuntajat aiheuttavat häviöitä. Muuntajattomat invertterit ovat yleisesti parempia hyötysuhteeltaan, mutta niissä menetetään mahdollisuus paneeleiden galvaaniseen erotukseen sähköverkosta.

#### 4.1.2 Lämpötilahäviöt

Kuten luvussa 2.2 mainittiin, aurinkokennon toiminta riippuu lämpötilasta. Aurinkopaneelien valmistajat ilmoittavat paneelin lämpötilakertoimen, joka on usein yksikköä  $\%/^{\circ}\text{C}$ . Tyypillinen lämpötilakertoimen arvo on noin  $0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Lämpötilakerroin on yksi olennainen arvo, mikä tulisi ottaa huomioon paneelia valitessa. Lämpötilahäviöt voidaan laskea kaavan 8 avulla.

$$P = \frac{(T - 25) \cdot \beta}{100}, \quad (8)$$

jossa  $T$  on kennon lämpötila ja  $\beta$  paneelin lämpötilakerroin

#### 4.1.3 Mismatch-häviöt

String- järjestelmissä sarjaankytketyn paneeliketjun virta on sama kaikilla paneeleilla. Tällöin ketjun virta määräytyy heikoimman paneelin mukaan. Yksittäinen paneeli saattaa rajoittaa koko järjestelmän tehontuottokykyä, jos sen ominaisuudet ovat heikommät kuin muilla paneeleilla.

Kaikki aurinkopaneelit eivät ole täysin samanlaisia, sillä tuotannossa tapahtuu aina pieniä virheitä ja koska paneelit menettävät epätasaisesti tehontuottokykyään ajan kuluessa. Erilaiset sähköiset ominaisuudet aiheuttavat string – järjestelmissä sen, että optimaalista tehoa ei saavuteta. Eri valmistajat antavat erilaisia toleransseja paneeleilleen ja ne vaihtelevat 2 % ja 10 % välillä. Pienellä toleranssilla ei kuitenkaan ole suurta vaikutusta tuottavuuteen. Myös järjestelmän osittainen varjostus aiheuttaa mismatch-häviöitä string-järjestelmissä. Jos varjo muuttaa yhdenkin paneelin tehontuottokykyä, laskee kaikkien paneelien tehontuottokyky.

Mismatch-häviöitä voidaan vähentää käyttämällä moduulitason komponentteja, kuten tehnoptimoijia tai mikroinverttereitä. Toinen tapa on käyttää ohitusdiodeja, jolloin heikommat paneelit ohitetaan. Tällöin kuitenkin menetetään ohitettujen paneelien koko teho.

Yhden paneeliketjun mismatch häviöitä voidaan mallintaa kaavalla 9

$$\Delta P = \frac{C + 2}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_{I_{mp}}}{I_{mp}} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \right], \quad (9)$$

jossa  $\Delta P$  on mismatch häviöt,  $C$  paneelin ominaisuuskerroin,  $\sigma_{I_{mp}}$  maksimitehopisteen virran keskihajonta,  $I_{mp}$  maksimitehopisteen virta ja  $L$  paneelien määrä ketjussa.

Paneelin ominaisuuskerroin  $C$  voidaan ratkaista yhtälöstä kaavassa 11

$$\frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} = \frac{C^2}{(1 + C)(C + \ln(1 + C))}, \quad (10)$$

jossa  $I_{mp}$  on maksimitehopisteen virta,  $U_{mp}$  maksimitehopisteen jännite,  $I_{sc}$  oikosulkuvirta,  $U_{oc}$  tyhjäkäyntijännite ja  $C$  paneelin ominaisuuskerroin

(Larsen, Lindquist, 2014.)

#### 4.1.4 Varjostumat

Luvussa 3.1 jo mainittiin varjojen heikentävästä vaikutuksesta aurinkosähköjärjestelmän tuottavuuteen. Keskimäärin säteilyintensiteetti vaihtelee 20 kertaa päivän aikana 20 ja 100 % välillä. Osittainen varjostuma saattaa aiheuttaa sen, että kennolla on useampia maksimitehopisteitä. Näiden löytäminen ja niiden väliltä valitseminen tuo suuren haasteen MPPT-algoritmeille. Varjot vaikuttavat säteilyintensiteetin lisäksi kennojen lämpötilaan. Lämpötila voi vaihdella 20 °C varjostuksen seurauksena. Suurin yksittäinen varjojen syy on pilvet, mutta näiden lisäksi varjoja voi syntyä myös puiden ja rakennusten takia sekä paneeleiden päälle kasaantuvan lumen, lehtien tai muiden roskien takia. (Valkealahti, 2016)

#### 4.1.5 Kennojen tuotantokyvyn heikkeneminen

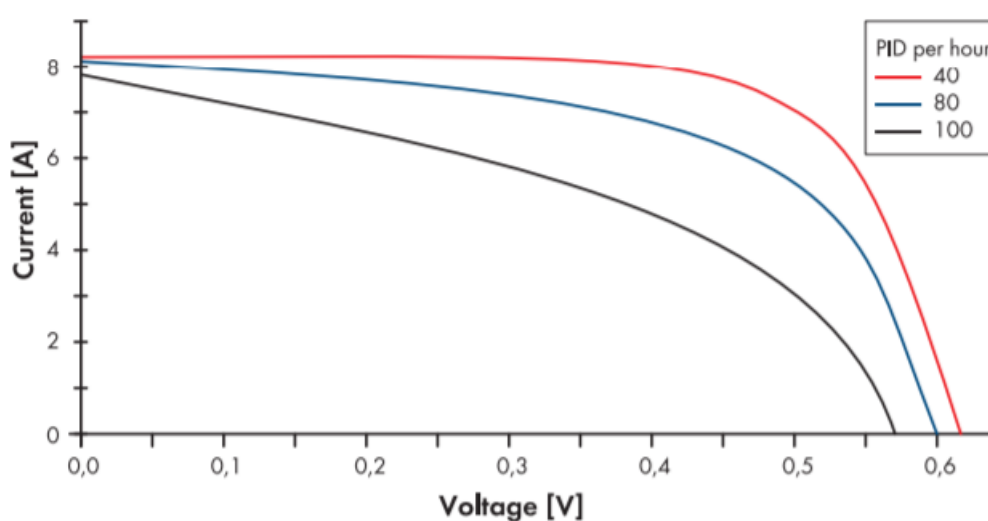
Aurinkokennot kuluvat luonnollisesti ajan myötä. Muun muassa paneeleiden mekaaninen vaurioituminen heikentää kennojen tehontuottokykyä ajan kuluessa. Kennoissa tapahtuvat mikromurtumat rikkovat kiderakennetta, joka lisää rekombinoitumista. Tätä prosessia on lähes mahdotonta estää. Toisilla aurinkopaneelilla kuluminen on kuitenkin maltillisempaa kuin toisilla. Tämän takia laadukkaan aurinkopaneelin valitseminen suunnitteluvaiheessa on tärkeää.

Monet valmistajat antavat tuotteilleen energiantuottotakuun. Tämä takuu tulee normaalin tuote- ja asennustakuun lisäksi ja eroaa siinä, että valmistaja lupaa, että paneeli tuottaa vähintään tietyn määrän energiaa tietyn ajan jälkeen. Esimerkiksi valmistaja saattaa luvata, että paneelit tuottavat 90 % alkuperäisestä energiasta 10 vuoden jälkeen ja 80 % alkuperäisestä energiasta 25 vuoden jälkeen. Paneelivalintaa tehdessä kannattaa kiinnittää huomiota energiantuottotakuuseen, etenkin siihen, että kuinka pitkälle ajalle valmistaja lupaa tuottoa. Esimerkiksi jos vertaa paneelia, jolla on 80 % energiantuottotakuu 25 vuoden jälkeen ja toista paneelia, jossa vastaava energia luvataan 30 vuoden päästä, voi ensimmäisen hyötysuhde olla 17 % jälkimmäistä huonompi 30 vuoden jälkeen.

Uusien aurinkopaneelien tuotantokyky heikkenee muutamalla prosentilla jo ensimmäisten tuntien aikana. Ilmiötä kutsutaan nimellä LID (light induced degradation). Tästä syystä oikeissa aurinkopaneelijärjestelmissä ei päästä yhtä suuriin hyötysuhteisiin, kuin laboratoriotestauksissa.

#### 4.1.6 PID

PID (Potential Induced Degradation) on ilmiö, joka heikentää aurinkosähköjärjestelmän tuottavuutta hitaasti ajan kuluessa. Ilmiö perustuu siihen, että DC-järjestelmässä esiintyy negatiivinen jännite maata vasten. Negatiivinen jännite järjestelmän maadoitettuihin osiin, esimerkiksi paneelien kehyksiin nähden aiheuttaa kapasitiivisen kytkennän maahan. Tästä syntyvä vuotovirta muuttaa kennojen varauksia, jolloin kennojen pn-liitoksen sähköiset ominaisuudet muuttuvat. Sähkökentän muutos vaikuttaa kennon virta-jännitekäyrään. Kennon oikosulkuvirta ja tyhjäkäyntijännite pysyvät suhteellisen samoina, mutta maksimithehopiste laskee ajan kuluessa huomattavasti. Ilmiö on voimakkaampaa suurilla jännitteillä, joten se on yleisempää string-järjestelmissä. Ilmiön voimakkuus riippuu myös ilmankosteudesta ja lämpötilasta. Korkeammassa lämpötiloissa ja kosteuksissa vuotovirta on suurempaa, sillä ilman eristävyys on silloin pienempi. PID:tä tapahtuu suurimmaksi osaksi piikennopaneelissa, mutta sitä on havaittu myös muissa paneelityypeissä. Muutokset virta-jännitekäyrässä ovat nähtävissä kuviossa 9.



KUVIO 9. Virta-jännitekäyrän muutokset PID:n seurauksena (kuva: SMA)

PID:n vaikutukset voidaan estää yksinkertaisesti maadoittamalla paneelin tai paneeliketjun miinusnapa, jolloin vuotovirtoja maahan ei pääse tapahtumaan. Maadoitus voidaan tehdä ainoastaan galvaanisesti erotetuissa järjestelmissä, sillä muuten maadoitus aiheuttaa järjestelmän sisäisen oikosulun. Jos käytetään invertteriä, jossa ei ole galvaanisesti erottavaa muuntajaa, voidaan dc-jännitteen napaisuutta kääntää esimerkiksi öisin, jolloin PID:n aiheuttama kuluminen voidaan peruuttaa. Tämä perustuu käänteisesti samaan ilmiöön kuin PID:ssä. Monella valmistajalla on markkinoilla laitteita, jotka pystyvät peruuttamaan PID:n vaikutukset. Kennojen palautuminen alkuperäiseen kuntoon kuitenkin kestää useita kuukausia. (Pingel, Frank, Winkler, Daryan, Geipel, Hoehne, Berghold, 2010)

#### **4.1.7 DC- ja AC-häviöiden vertailu**

Tämä luku toimii yhteenvetona aurinkosähköjärjestelmän häviöihin. Lisäksi tässä luvussa vertaillaan DC- ja AC-järjestelmiä häviöiden näkökulmasta. String-järjestelmissä tuotettu teho siirretään invertterille tasasähköllä, kun taas mikroinvertteireitä hyödyntävässä järjestelmässä teho siirretään vaihtosähköllä, sillä invertteri sijaitsee paneelin yhteydessä.

String-järjestelmissä paneeliketjujen pituudet, eli sarjaankytkettyjen paneeleiden määrä määrittää DC-kaapelin jännitteen. Kaapelihäviöiden minimoimiseksi virta tulisi olla mahdollisimman pieni eli saman tehon siirtämiseksi jännitteen tulisi olla suurempi. Toisaalta suuri tasajännite kasvattaa PID -häviöiden määrää, ellei sen estämiseksi ole tehty toimenpiteitä. Tasajännitteen ei tulisi pienissä ja keskikokoisissa järjestelmissä nousta yli 1500 V, sillä sitä korkeammilla jännitteillä siirryttäisiin keskijännitteeseen, mikä asettaa järjestelmälle tiukemmat vaatimukset.

AC-järjestelmissä jännitetaso pysyy muuttumattomana, sillä se määräytyy sähköverkon jännitteen mukaan. Näin ollen tehon kasvaessa suhteelliset häviöt kasvavat lineaarisesti. AC:lla kaapelihäviöitä lisäksi kasvattaa induktanssi, mutta koska kaapelointietäisyydet ovat usein lyhyitä, ei sillä ole suurta merkitystä.

Mismatch-häviöt puolestaan vaikuttavat lähinnä DC-järjestelmiin, sillä mikroinverttereiden ansiosta ne voidaan välttää AC-järjestelmissä. DC:llä ne voidaan välttää käyttämällä optimoijia.

## 4.2 Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa huomioitavat asiat

Hyvällä suunnittelulla voidaan saavuttaa parempi tuottavuus aurinkosähköjärjestelmälle. Toisaalta suunnitteluvirheiden takia järjestelmästä voi tulla kallis ja huonosti tuottava. Tässä luvussa käsitellään asioita, joita suunnittelussa olisi hyvä huomioida.

### 4.2.1 Mitoitus

Tässä työssä keskitytään suoraan sähköverkkoon kytkettäviin aurinkosähköjärjestelmiin. Kun suunnitellaan tällaista yksityistä aurinkosähköjärjestelmää, tulisi se mitoittaa niin, että mahdollisimman suuri osa tuotetusta energiasta tulisi omaan käyttöön, jolloin aurinkosähköllä korvattaisiin energiayhtiöltä ostettua sähköä. Tällä hetkellä ylimääräisen sähköenergian myyminen verkkoon ei ole pientuottajalle kannattavaa, sillä yleensä verkkoon myydystä energiasta saadaan ainoastaan sähkön pörssihinta, joka määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan. Yleensä sähkön hinta on alhaisin kesällä, jolloin myös aurinkosähköjärjestelmät tuottavat eniten. Jos energian ostaa energiayhtiöltä, tulee pörssihinnan päälle energiayhtiön kate, siirtomaksut sekä sähkö- ja arvonnäkövero. Tällöin sama energiamäärä, joka syötetään verkkoon tuottaa vain osan siitä rahamäärästä, mikä maksettaisiin myöhemmin samasta energiamäärästä. Sähkön markkinahinnan päälle tulevat maksut voivat olla jopa kaksi kolmasosaa pientuottajan maksamasta sähkön kokonaishinnasta (Motiva, 2020).

Jotta aurinkosähköjärjestelmän ostajan energiankulutus voitaisiin arvioida tarkasti, olisi järkevää mitata kulutusta ennen mitoitusta. Ostajalla voi olla tarkkaakin tietoa energiankulutuksestaan, mutta jos näin ei ole, voidaan kulutusta mitata esimerkiksi verkkoanalysointilla.

Invertterin mitoitusta tehtäessä on otettava huomioon se, että invertteri ei pysty siirtämään enempää tehoa, kuin sen maksimitehoksi on ilmoitettu. Tällöin osa energiasta niin sanotusti leikkaantuu pois, jolloin se menetetään lämpönä. Jos tiedetään, että järjestelmä ei tule toimimaan nimellistehollaan, voidaan invertteri mitoittaa hieman pienemmäksi kuin aurinkopaneeleiden nimellisteho. Tässä tulisi

löytää sopiva arvo, jotta invertteriä ei ylimitoitettaisi, mutta vältettäisiin tehon leikkaantuminen.

#### **4.2.2 Mekaaninen suunnittelu**

Se, missä kulmassa auringonsäteily osuu aurinkopaneeleihin, vaikuttaa suuresti tuotetun energian määrään. Optimaalisesti säteilyn tulisi olla kohtisuoraan paneeleita vastaan. Säteilyn kokonaisheijastuminen pyritään välttämään kaikissa tilanteissa. Optimaalinen kiinteä kallistuskulma, jossa maksimoidaan koko vuoden energiantuotanto, on Etelä-Suomessa reilut 40 astetta vaakatasoon nähden. Toinen paneelien suuntauksessa käytetty arvo on atsimuutti, eli mihin ilman suuntaan paneelit osoittavat. Optimiatsimuutti on pohjoisella pallonpuoliskolla luonnollisesti etelään.

Jos järjestelmän asennuspaikka on mahdollista valita, tulisi sen olla sellainen, että etelän suuntaan olisi mahdollisimman esteetön linja, jolloin ylimääräisiä varjoja voidaan välttää. Myös alueen tyypillinen tuulen suunta kannattaa ottaa huomioon. Jos tuuli pääsee esteettömästi viilentämään aurinkopaneeleita, voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde ja sitä kautta parempi tuottavuus. Asennus kannattaa toteuttaa niin, että tuulen jäähdyttävä vaikutus olisi mahdollisimman suuri.

Myös materiaali, jolle aurinkopaneelit asennetaan, vaikuttaa tuottavuuteen. Etenkin bifacial-paneeleissa taustamateriaalin albedo vaikuttaa suoraan säteilyintensiteetin määrään. Pintojen tulisi olla vaaleita, jolloin suurempi osa säteilystä heijastuisi takaisin ja voitaisiin hyödyntää. Tummat pinnat absorboivat enemmän säteilyä, jolloin sitä ei saada paneelien hyödynnettäväksi. Lisäksi tummat pinnat lämpenevät ja saattavat vaikuttaa myös kennojen lämpötiloihin.

#### **4.3 Huolto ja kunnossapito**

Jotta aurinkosähköjärjestelmän tuottavuus pysyy hyvällä tasolla, kuuluu järjestelmää huoltaa. Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa sitä, että paneelien päältä poistetaan ylimääräinen materiaali ja paneelit pestään säännöllisesti. Valmistajilla on usein ohjeet huoltotoimenpiteille ja niitä tulisi noudattaa. Monilla invertte-



rivalmistajilla on sovelluksia, joilla voidaan seurata tuotetun sähkön määrää. Tuotantoa kannattaa seurata säännöllisesti ja jos koko järjestelmä tai yksittäiset paneelit eivät tuota yhtä hyvin kuin ennen, tulisi ottaa yhteyttä järjestelmän toimittajaan.

## 5 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin erilaisten aurinkosähköjärjestelmien vertailuun. Suurin huomio oli erilaisissa invertterijärjestelmissä. Lopputuloksena saatiin, että paras tuottavuus saavutettiin käyttämällä tehnoptimoijia. Optimoijilla saadaan paras mahdollinen teho aurinkopaneelista käyttöön ja niillä voidaan välttää mismatch-häviöitä. Myös mikroinvertterit mahdollistavat tämän, mutta ne eivät pärjänneet tutkimuksessa yhtä hyvin mahdollisesti hieman heikomman hyötysuhteen takia. Syitä tuloksille voi toki olla useita ja jotta niistä saataisiin parempi selvyys, olisi jatkotutkimuksessa tehtävä tarkempaa seurantaa järjestelmistä esimerkiksi kaapeloinnin osalta.

Työssä keskityttiin aurinkosähköjärjestelmiin tuottavuuden näkökulmasta. On kuitenkin syytä muistaa, että aurinkosähköjärjestelmät ovat ennen kaikkea investointi ja investointien oletetaan maksavan itsensä takaisin kohtuullisessa ajassa. On siis hyvä muistaa, että taloudellinen näkökulma on aurinkosähköjärjestelmissä yksi tärkeimpiä. Tuottavuus on lopulta vain yksi osa-alue järjestelmää hankittaessa ja suunniteltaessa. Työssä käsittelemättömistä osa-alueista mainittakoon myös energian varastointi. Etenkin suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä varastointi on tärkeää, jotta saavutetaan tasainen tehontuottokyky. Tulevaisuudessa energian varastointi tulee olemaan myös pienemmän kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä tärkeässä osassa. Tällöin aurinkosähköjärjestelmän mitoitusperiaatteet menisivät uusiksi, sillä mitoitusta ei tarvitsisi tehdä pohjakulutuksen perusteella.

Tulevaisuudessa aurinkosähköjärjestelmien hinta tulee todennäköisesti jatkamaan laskuaan, sillä järjestelmiä toimitetaan yhä enemmän. Myös järjestelmien hyötysuhteet todennäköisesti tulevat hieman parantumaan uusien tekniikoiden myötä. Monenlaisia uusia tekniikoita on kehityksessä kolmannen sukupolven aurinkokennoiksi. Monet näistä perustuvat nanoteknologiaan ja yksi esimerkki näistä on väriaineaurinkokennot. Näillä ei kuitenkaan vielä ole asemaa markkinoilla.

## LÄHTEET

Ahola, J. National Survey Report of PV Power Applications in Finland 2018. International Energy Agency. Luettu 27.9.2019. [http://www.iea-pvps.org/index.php?id=93&elD=dam\\_frontend\\_push&docID=4852](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=93&elD=dam_frontend_push&docID=4852)

Inkinen, P., Tuohi, J. 1999 Momentti 1 Insinöörifysiikka. Kustannusosakeyhtiö Otava

Inkinen, P., Manninen, R., Tuohi, J. 2002 Momentti 2 Insinöörifysiikka. Kustannusosakeyhtiö Otava

Korpela, A. 2014 Aurinkosähkön perusteet

Yu, Z., Ogboenyira, K. 2009 Renewable Energy Through Micro-Inverters. Luettu 4.12.2019. <https://www.powerselectronics.com/discrete-power-semis/renewable-energy-through-micro-inverters>

Bypass Diodes in Solar Panels. Luettu 4.12.2019. <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>

Faranda, R., Leva, S. 2008. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>

SMA, PID - The Problem and How to Solve It. Tekninen ohje. Luettu 3.1.2020. <http://files.sma.de/dl/7418/PID-PVBox-TI-en-10.pdf>

Pingel, S., Frank, O., Winkler, M., Daryan, S., Geipel, T., Hoehne, H., Berghold, J. 2010. Potential Induced Degradation of solar cells and panels

Famoso, F., Lanzafame, R., Maenza, S., Scandura, P., 2014. Performance comparison between micro-inverter and string-inverter Photovoltaic Systems

California Energy Commission, California Public Utilities Commission. Grid Support Inverter List. Ladattu 10.1.2020. [https://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/documents/Utility\\_Interactive\\_Inverter\\_List\\_Full\\_Data.xlsm](https://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/documents/Utility_Interactive_Inverter_List_Full_Data.xlsm)

Valkealahti, S. 2016. Solar PV system research in Finland for export industry. Tampere University of Technology.

Pickerel, K. 2018. What is a half-cell solar panel? <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/10/what-is-a-half-cell-solar-panel/>

Jinko Solar. Swan Bifacial Modules. Esite. Luettu 16.1.2020. <https://jinkosolar.eu/files/jinko/download/Swan%20Bifacial%20Whitepaper.pdf>

PV Performance Modeling Collaborative. Single Diode Equivalent Circuit Models. Luettu 20.1.2020. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/diode-equivalent-circuit-models/>

Shockley, W. Queisser, H. 1960. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells.

Kopidakis, N. 2019. Conversion efficiencies of best research solar cells worldwide from 1976 through 2019 for various photovoltaic technologies, National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Ala Myllymäki, E. 2016. Aurinkodemo. Oy Merinova Ab.

Larsen, A. Lindquist, P. 2014. Forecasting mismatch losses: An empirical study investigating module level inverter- and string inverter systems. KTH School of Industrial Engineering and Management.

Residential Solar Panel Systems. Luettu 9.4.2020. <https://www.lets-gosolar.com/solar-panels/home-and-residential/complete-systems/>

Motiva. Ylijäämänsähkön myynti. Luettu 3.4.2020. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman\\_kaytto/ylijaama-sahkon\\_myynti](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaama-sahkon_myynti)

## LIITTEET

### Liite 1. Aurinkosähköjärjestelmien tekniset ja tutkimuksesta saadut tiedot

Järjestelmä	Nimellisteho (kWp)	Energia/Vuosi (kWh)	Invertteri	Paneeli	Kulma	Atsimuutti	Säteily (kWh/m <sup>2</sup> )	PR (%)
Hoymiles 1	4,14	2890	Hoymiles MI	Sharp 330Wp (P-Si)	40	50	901,08	<b>77,5</b>
Hoymiles 2	5,04	4210	Hoymiles MI	Sharp 330Wp (P-Si)	35	10	1005,28	<b>83,1</b>
Hoymiles 3	6,10	4530	Hoymiles MI	Sharp 330Wp (P-Si)	35	-10	977,70	<b>76,0</b>
SMA 1	7,28	5956	SMA stp 7000tl	Hanwha Q.CELLS Q.Peak-G3 280 (M-Si)	29	5	1059,20	<b>77,2</b>
SMA 2	4,59	3502	SMA stp 6000TL-20	Heckert Solar AG NeMo 60M (M-Si)	18	45	988,21	<b>77,2</b>
SMA 3	7,32	6829	SMA stp 6000TL-20	Heckert Solar AG NeMo 60M (M-Si)	22	0	1094,15	<b>85,3</b>
SMA 4	8,08	6934	SMA stp 8000TL-20	Hanwha Q.Cells GmbH Q.Pro-G3 250 (P-Si)	22	30	1089,52	<b>78,8</b>
SMA 5	28,35	26560	SMA stp 25000TL-30	Trina Solar Energy TSM-270PD05.08 (P-Si)	30	10	1075,36	<b>87,1</b>
Solaredge 1	5,20	4077	SE7K	EC Solar ECS-315D (M-Si)	0	0	926,93	<b>84,6</b>
Solaredge 2	150,00	116682	SE27.6K	Jinko Solar JKM320PP-72 (P-Si)	10	90	931,05	<b>83,5</b>
Solaredge 3	47,88	35479	SE25K	Salosolar 4BB SS330P (P-Si)	15	64	853,51	<b>86,8</b>
Solaredge 4	13,68	8742	SE17K	Miasole Flex-02NL (CIGS)	75	40	962,64	<b>66,4</b>