



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EERO HYÖTYLÄ
KESKITETYN AURINGONVALON MONILIITOSAURINKOKENNO-
JEN KYTKENTÖJEN MALLINTAMINEN JA TEHON OPTIMOINTI
AURINKOPANEELISSA

Diplomityö

Tarkastajat:
Prof. Seppo Valkealahti
TkT Arto Aho
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
9. elokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

EERO HYÖTYLÄ: Keskitetyn auringonvalon moniliitosaurinkokennojen kytkentöjen mallintaminen ja tehon optimointi aurinkopaneelissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 63 sivua

Helmikuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: Prof. Seppo Valkealahti, TkT Arto Aho

Avainsanat: Simulink, simulaatio, keskitetty auringonvalo, aurinkokenno, aurinkopaneeli, moniliitos

Diplomityössä luotiin simulaatiomalli korkean hyötysuhteen kolmiliitosaurinkokennolle ja auringonvaloa keskittävälle aurinkopaneelille Mathworksin Matlab/Simulink-ohjelmiston avulla. Optoelektronikan tutkimuskeskuksessa (ORC) valmistetuille kolmiliitosaurinkokennoille tarvittiin simulaatiomalli, jotta niiden sähköistä käyttäytymistä voitaisiin tutkia aurinkopaneelissa erilaisissa olosuhteissa. Simulink-simulaatiomallissa käytettiin fyysisiä kytkentöjä mallintavia Simscape-komponentteja. Simulaatioiden tuloksena aurinkokennoille ja aurinkopaneeleille saatiin jännitettä nostamalla laskettua kutakin jännitettä vastaava virta. Jännitteiden ja niitä vastaavien virtojen avulla voitiin laskea myös kutakin jännitettä vastaava teho, jolloin aurinkokennoille ja aurinkopaneeleille voitiin muodostaa virta-jännite- ja teho-jännite-ominaiskäyrät. Virtojen, jännitteiden ja tehojen avulla aurinkokennoille ja aurinkopaneeleille voitiin määrittää myös oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täytekerroin ja hyötysuhde. Simulaatiomallien todettiin vastaavan mitattujen kolmiliitosaurinkokennojen sähköistä käyttäytymistä vertailemalla mittauksien ja simulaatioiden tuloksia.

Simulaatiomallin avulla yksittäisten kolmiliitosaurinkokennojen ja niistä muodostuvien aurinkopaneelien sähköistä toimintaa voitiin simuloida eri lämpötiloissa, sekä erisuuruisilla valon intensiteeteillä. Mittausten ja simulaatioiden tuloksena tutkimuksen kohteena olleelle kolmiliitosaurinkokennolle määritettiin oikosulkuvirran, oikosulkuvirrantiheyden, avoimen piirin jännitteen, maksimitehon, täytekerroimen ja hyötysuhteen lämpötilakertoimet. Pinta-alaltaan $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisella kolmiliitosaurinkokennolla maksimitehon lämpötilakerroin oli noin $-48 \mu\text{W}/^\circ\text{C}$ ja hyötysuhteen lämpötilakerroin noin $-5,3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$. Diplomityössä tutkittiin myös aurinkopaneelin maksimitehopisteen sijoittumista virran ja jännitteen suhteen aurinkokennojen erilaisilla kytkentätopologioilla, sekä aurinkopaneelin epätasaista lämpötilajakaumaa aurinkokennojen jäähtyessä ja kuumentuessa aurinkopaneelissa. Tutkimusten kohteena olivat niin ikään kolmiliitosaurinkokennon sisäiset oikosulut ja kolmiliitosaurinkokennojen epätasainen valon intensiteettijakauma. Tutkimuksissa havaittiin, että valon epätasainen intensiteettijakauma pienensi kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhdetta noin 0,8 % tasaiseen intensiteettijakaumaan verrattuna. Lisäksi diplomityössä tutkittiin kolmiliitosaurinkokennon pinnalla olevia metallisia kontaktisormia ja valoa keskittävän linssin ja kolmiliitosaurinkokennon välisiä kohdistusvirheitä.

ABSTRACT

EERO HYÖTYLÄ: Power optimization and modelling of connections in solar panel consisting of concentrated photovoltaics multi-junction solar cells

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 63 pages

February 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Renewable electrical energy technologies

Examiners: Prof. Seppo Valkealahti, TkT Arto Aho

Keywords: Simulink, simulation, concentrated photovoltaics, solar cell, solar panel, multi-junction

Electrical equivalence model for high efficiency triple-junction solar cells and concentrated photovoltaics solar panels was built using Mathworks Matlab/Simulink software. Simulation model was needed for solar cells, fabricated in Optoelectronics Research Centre (ORC), to examine their electrical behaviour in solar panel under different operation conditions. Simscape components, which model physical connections, were used in Simulink circuit design. As an outcome of the simulation, current was calculated for solar cells and solar panels when voltage was raised. Power for each voltage was calculated using the voltages and corresponding currents, which enabled the generation of current-voltage and power-voltage characteristics for solar cells and solar panels. Utilizing currents, voltages and powers enabled the calculations of short-circuit current, short-circuit current density, open circuit voltage, maximum power, fill factor and efficiency for solar cells and solar panels. Comparing the results of measurements and simulations it was verified that simulation models matched the electrical behaviour of measured triple-junction solar cells.

Circuit design enabled the electrical simulations of triple-junction solar cells and solar panels consisting of triple-junction solar cells in various temperatures and differing light intensities. As an outcome of the simulations and measurements of the solar cell under research, temperature coefficients were defined for short-circuit current, short-circuit current density, open circuit voltage, maximum power, fill factor and efficiency. Temperature coefficient of maximum power was $-48 \mu\text{W}/^\circ\text{C}$ and temperature coefficient of efficiency was $-5.3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$. The area of the triple-junction solar cell was 0.91 mm^2 . In this thesis, solar panel maximum power point location was also observed in relation to current and voltage under various wiring topologies along with solar panel uneven temperature distribution consisting of cooled down and heated solar cells. Furthermore, internal short-circuits of triple-junction solar cells and uneven intensity distribution of triple-junction solar cells was investigated. It was noted that efficiency of triple-junction solar cell decreased by 0.8 % under uneven intensity distribution compared to uniform intensity distribution. In addition, metal grid contacts on top of triple-junction solar cell and alignment error between concentrated photovoltaics optics and triple-junction solar cell, were studied.

ALKUSANAT

Tämä dokumentti on diplomityöni aiheesta keskitetyn auringonvalon moniliitosaurinkokennojen kytkentöjen mallintaminen ja tehon optimointi aurinkopaneelissa. Diplomityöni on tehty optoelektronikan tutkimuskeskuksessa (ORC) Tampereen teknillisellä yliopistolla. Diplomityöaiheeni on relevantti omien arvojeni, kiinnostusten kohteideni ja koulutukseni kannalta. Tavoitteenani on omalta osaltani edistää uusiutuvien energiantuotantoteknologioiden tutkimusta ja kehitystä, jotta niiden käyttö yleistyisi maailmalla.

Haluan kiittää kaikkia optoelektronikan tutkimuskeskuksessa olleita työkavereitani mahdollista työyhteisöstä sekä laadukkaista julkaisuista, jotka olivat hyödyksi diplomityötä tehdessä. Haluan kiittää erityisesti TkT Arto Ahoa diplomityöni ohjaamisesta. Kiitos TkT Arto Aholle ja Lauri Hytöselle heidän suorittamistaan aurinkokennomittauksista, jotka mahdollistivat diplomityöni mittauksiin perustuvat simulaatiot. Suuri kiitos diplomityöni tarkastajalle professori Seppo Valkealahdelle kehittävästä palautteesta ja asiantuntevasta opetuksesta. Erityiskiitos myös Kristin Suorsalle päivittäisestä tuesta.

Tampereella, 22.1.2018

Eero Hyötylä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	AURINKOKENNOT	3
2.1	Yksiliitosaurinkokennot	3
2.2	Moniliitosaurinkokennot	3
2.3	Auringonvaloa keskittävä optiikka.....	5
2.4	Auringon säteilyspektri	6
2.5	Aurinkokennojen hyötysuhteet	8
2.6	Aurinkokennojen sähköinen käyttäytyminen	10
2.7	CPV-teknologian hyödyt ja haasteet	12
3.	AURINKOPANEELIN SIMULAATIOMALLI	13
3.1	Kolmiliitosaurinkokennon piirimalli	13
3.2	Aurinkopaneelin Simulink-simulaatiomalli	14
3.3	Kolmiliitosaurinkokennon Simulink-simulaatiomalli	17
3.4	Kolmiliitosaurinkokennon tunnusluvut.....	18
3.4.1	Ideaalisuustekijä.....	18
3.4.2	Oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite	19
3.4.3	Resistiiviset häviöt.....	20
3.4.4	Energia-aukko	20
3.4.5	Lämpötilakertoimet.....	21
4.	MATLAB/SIMULINK-SIMULAATIOT	24
4.1	Valon intensiteetin vaikutus kolmiliitosaurinkokennon toimintaan.....	24
4.2	Lämpötilan vaikutus kolmiliitosaurinkokennon toimintaan	27
4.3	CPV-aurinkopaneelien kytkentätopologiat	30
4.4	CPV-aurinkopaneelin lämpötilajakauma	35
4.5	CPV-aurinkopaneelin varjostuminen	38
4.6	Kolmiliitosaurinkokennon kontaktisormet.....	41
4.7	Kolmiliitosaurinkokennon sisäiset oikosulut	45
4.8	Linssin muodostama valon epätasainen intensiteettijakauma.....	49
5.	CPV-AURINKOKENNON MITTAUKSET.....	53
5.1	Aurinkosimulaattori	53
5.2	Ulkomittausasema	53
5.3	Linssin ja aurinkokennon välinen kohdistusvirhe.....	54
6.	YHTEENVETO	58
	LÄHTEET	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	Ilmamassa
AM0	Ilmamassa Maan ilmakehän ulkopuolella
AM1.5g	Globaali ilmamassa Maan pinnalla
AM1.5d	Suora ilmamassa Maan pinnalla
ARC	Heijastuksenestopinnoite
CPV	Valoa keskittävä aurinkokennovoima
D	Diodi
EQE	Kvanttivyötysuhde
GaAs	Galliumarsenidi
GaInNaSb	Galliumindiumnitridiarsenidiantimonidi
GaInP	Galliumindiumfosfidi
Ge	Germanium
HCPV	Korkean konsentraation valoa keskittävä aurinkokennovoima
IEC	Kansainvälinen sähkötekniikan komissio
LCPV	Matalan konsentraation valoa keskittävä aurinkokennovoima
MBE	Molekyylisuihkuepitaksia
MOCVD	Metallo-orgaaninen kaasufaasipinnoitus
MOVPE	Metallo-orgaaninen kaasufaasi epitaksia
MPP	Maksimitehopiste
MPPT	Maksimitehopisteen seuraaja
ORC	Optoelektronikan tutkimuskeskus
P&O	Perturbaatio ja tarkkailu algoritmi
STC	Standardisoitu testiolosuhde

A	Pinta-ala
α_{ph}	Valovirran lämpötilakerroin
α_{Rs}	Sarjaresistanssin lämpötilakerroin
α_s	Saturaatiovirran lämpötilaeksponentti
E_g	Energia-aukon suuruus
FF	Täytekerroin
G	Valon intensiteetti
η	Hyötysuhde
I	Virta
I_D	Diodin läpi kulkeva virta
I_{MP}	Maksimitehon virta
I_{MPP}	Maksimitehopisteen virta
I_{o1}	Saturaatiovirta kvasi-neutraaleilla alueilla
I_{o2}	Saturaatiovirta tyhjennysalueella
I_{ph}	Valovirta
$I_{ph}(T)$	Valovirta lämpötilassa T
$I_{ph}(T_{STC})$	Valovirta STC-olosuhteen lämpötilassa
I_{s1}	Yksidiodimallin saturaatiovirta
I_{SC}	Oikosulkuvirta
I'_{SC}	Häviötön oikosulkuvirta
J	Virrantiheys
J_{SC}	Oikosulkuvirrantiheys
k	Boltzmannin vakio
N	Ideaalisuustekijä

N_1	Ideaalisuustekijä kvasi-neutraaleilla alueilla
N_2	Ideaalisuustekijä tyhjennysalueella
P	Teho
P_{MP}	Maksimiteho
P_{MPP}	Maksimitehopisteen teho
q	Alkeisvaraus
R	Resistanssi
R_s	Sarjavastuksen resistanssi
R_{sh}	Rinnakkaisvastuksen resistanssi
R_{tun}	Tunneliliitoksen resistanssi
T	Lämpötila
T_{STC}	Standardisoidun testiolosuhteen lämpötila
V	Jännite
V_{MP}	Maksimitehon jännite
V_{MPP}	Maksimitehopisteen jännite
V_{OC}	Avoimen piirin jännite

1. JOHDANTO

Aurinkoenergiateknologioiden kehitys ja käyttöönotto ovat olleet vahvasti riippuvaisia tukiohjelmista ja poliittisista päätöksistä. Tänä päivänä aurinkoenergialla tuotettu energia on kuitenkin uusiutuvista energiantuotantomuodoista hinnaltaan kilpailukykyinen muiden energiantuotantomuotojen kanssa. Etenkin taloudelliset ja ympäristölliset haasteet vaikuttavat aurinkoenergiateknologioiden yleistymiseen. Ilmastonmuutoksen hillitseminen, kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen, energiantuotannon omavaraisuus ja taloudellisen kannattavuuden parantaminen tukevat aurinkoenergian tuotantoa. Aurinkoenergian tuotanto ei vaadi kalliita polttoaineita, sillä Auringon säteilyenergia on vapaasti hyödynnettävissä. Aurinkoenergialla on suuri potentiaali kasvattaa markkinaosuuttaan maailman energiantuotantomuodoista. [14, s. 1–5][15, s. 3–9][20, s. 5]

Aurinkoenergiateknologioista auringonvaloa keskittävillä (CPV) moniliitosaurinkokennoilla on saavutettu suurin hyötysuhde 46 %. Aurinkopaneeleilla saavutettu hyötysuhde on hieman alhaisempi kuin yksittäisillä aurinkokennoilla saavutettu hyötysuhde. Tutkimuskäytössä CPV-aurinkopaneelilla suurin saavutettu hyötysuhde on 38,9 %. Aurinkokennoissa ja aurinkopaneeleissa on kuitenkin vielä optimoimisen varaa ja niiden hyötysuhdetta pyritään nostamaan entisestään. Sähköverkkoon kytkettyjä kaupallisia CPV-aurinkopaneeleita on asennettu maailmalla yhteensä kokonaiskapasiteetiltaan jo yli 370 MWp. [16, s. 5–6]

Optoelektronikan tutkimuskeskuksessa (ORC) valmistetaan ja tutkitaan korkean hyötysuhteen moniliitosaurinkokennoja, joista on tehty tutkimusta muun muassa väitöskirjan [3] ja julkaisujen [2, 6, 7] muodossa. Tässä diplomityössä tehty aurinkokennotutkimus tukee tutkimusta simulaatioiden avulla. Tavoitteena oli luoda simulaatiomalli kolmiliitosaurinkokennolle ja kolmiliitosaurinkokennoista koostuvalle aurinkopaneelille. Simulaatiotulosten avulla oli tavoitteena ennakoida kolmiliitosaurinkokennojen ja niistä koostuvien aurinkopaneelien sähköistä käyttäytymistä muun muassa eri lämpötiloissa, eri valon intensiteeteillä ja erilaisissa ongelmatilanteissa.

Kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalli luotiin Mathworksin Matlab/Simulink-ohjelmiston avulla. CPV-aurinkopaneelin simulaatiomalli saatiin luotua kytkemällä useita kolmiliitosaurinkokennoja rinnan sekä sarjaan. Aurinkopaneelin yhteydessä käytettävien linssien valoa keskittävä ominaisuus toteutettiin yksinkertaisesti valon intensiteettiä nostamalla. Diplomityössä toteutettu kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalli perustui laboratoriossa suoritettuihin mittauksiin. Aurinkosimulaattorin, eli keinoauringon, avulla mitattiin muun muassa virta ja jännite tutkimuskäytössä olleista kolmiliitosaurinkokennoista valon eri intensiteeteillä eri lämpötiloissa.

Simulaatioiden avulla voitiin tarkastella aurinkopaneelin sähköiseen käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä, kuten kytkentätopologian muutoksia, valon intensiteetin muutoksia ja lämpötilan muutoksia. Työssä tarkasteltiin CPV-aurinkopaneelin ongelmatilanteita, kuten aurinkopaneelin epätasaista lämpötilajakaumaa ja aurinkopaneelin osittaista varjostumista. Lisäksi työssä tarkasteltiin kolmiliitosaurinkokennon epätasaista valon intensiteettijakaumaa, kolmiliitosaurinkokennon sisäisiä oikosulkuja ja kolmiliitosaurinkokennon pinnalla olevien metallisten kontaktisormien vaikutuksia kolmiliitosaurinkokennon sähköiseen käyttäytymiseen.

Diplomityössä suoritettujen simulaatioiden yhteydessä simuloitiin aurinkokennojen ja aurinkopaneelien virta-jännite- sekä teho-jännite-käyrät Matlab/Simulink-ohjelmiston avulla. Tulosten yhteydessä esitettiin myös tutkittavan ongelman kannalta relevantit tunnusluvut taulukoituna. Aurinkokennojen ja aurinkopaneelien suorituskykyä vertailtiin erityisesti hyötysuhteen ja tuotetun tehon avulla.

Kolmiliitosaurinkokennojen mittauksia suoritettiin valoa keskittävän linssin avulla, sekä aurinkosimulaattorilla että ulkomittausasemalla. Mittauksien avulla tutkittiin aurinkokennon ja valoa keskittävän linssin välisen kohdistusvirheen vaikutusta aurinkokennon tuottamaan tehoon. Aurinkosimulaattorin tuottama valo jäljittelee auringonvaloa, mutta aurinkosimulaattorissa on rajoitteita, joiden johdosta sen tuottama valo ei vastaa täysin auringonvaloa. Diplomityössä vertailtiin kolmiliitosaurinkokennojen aurinkosimulaattorimittausten ja ulkoasemamittausten tuloksia, jotta saataisiin parempi käsitys, kuinka paljon aurinkosimulaattorin tuottama valo eroaa todellisesta auringonvalosta.

2. AURINKOKENNOT

Vuoden 2017 loppuun mennessä asennetun aurinkoenergian tuotantokapasiteetin määrä maailmassa oli arvioiden mukaan yhteensä noin 387 GW [15, s. 16]. Lukema koostuu kaikkien aurinkoenergiateknologioiden yhteenlasketusta kapasiteetista. Aurinkoenergiaa tuottaviin teknologioihin kuuluvat muun muassa erilliskiteiset piiaurinkokennot, monikiteiset piiaurinkokennot, ohutkalvoaurinkokennot, auringonvaloa keskittävät CPV-aurinkokennot, orgaaniset aurinkokennot, perovskiitti aurinkokennot, väriherkät aurinkokennot ja kvanttipisteaurinkokennot [22]. CPV-aurinkopaneelien asennettu kokonaiskapasiteetti vuonna 2017 oli noin 370 MWp [16, s. 5]. Näin ollen CPV-aurinkopaneelien osuus oli noin 0,1 % aurinkoenergian kokonaistuotantokapasiteetista [20, s. 3].

2.1 Yksiliitosaurinkokennot

Erilliskiteiset ja monikiteiset piiaurinkopaneelit ovat hallinneet aurinkopaneelimarkkinoita jo vuosikymmeniä. Vuonna 2016 piiaurinkokennoihin perustuvien teknologioiden osuus aurinkoenergian kokonaiskapasiteetista maailmassa oli noin 94 %. Yksittäisistä teknologioista monikiteiset piiaurinkokennot olivat eniten käytetty aurinkokennoteknologia vuonna 2016, niiden osuuden ollessa noin 70 % maailman aurinkoenergian tuotantokapasiteetista. [23, s. 5–20]

Erilliskiteisiä piiaurinkokennoja valmistetaan suurista sylinterin muotoisista piitangoista. Yksittäiset piiaurinkokennot erotetaan sahaamalla tanko ohuiksi kiekkoiksi. Erilliskiteisessä piiaurinkokennossa kidesotot ovat järjestyneet samaan kidesuuntaan. Monikiteisten piiaurinkokennojen valmistus on halvempaa kuin erilliskiteisten piiaurinkokennojen valmistus, mutta monikiteiset piiaurinkokennot eivät ole syrjäyttäneet erilliskiteisiä piiaurinkokennoja kokonaan, sillä monikiteisten piiaurinkokennojen hyötysuhde on hieman alhaisempi. Monikiteisiä piiaurinkokennoja valmistetaan nauhamaiseksi rakenteeksi, jossa kiderakenteella ei ole tarkkaa järjestystä. [14, s. 28]

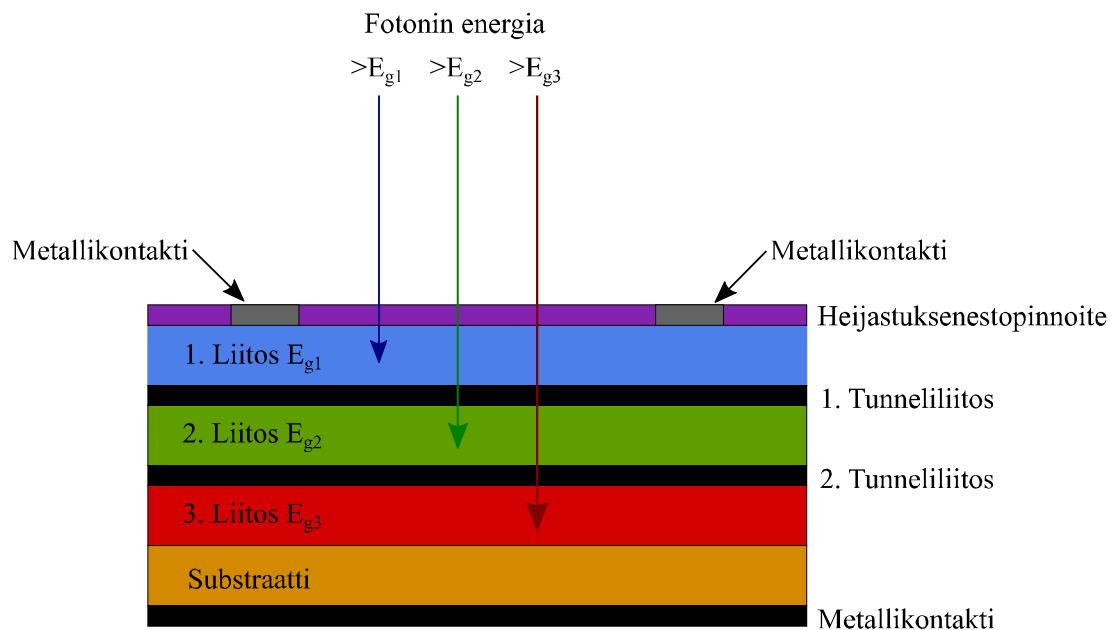
Aurinkokennon rakenne vastaa puolijohdediodin rakennetta, sillä molemmissa komponenteissa on liitos, joka erottaa elektronit ja aukot toisistaan. Liitos muodostetaan tuomalla yhteen p-tyyppin ja n-tyyppin puolijohteet, jolloin niiden rajapintaan muodostuu tyhjennysalue. Liitosta kutsutaan pn-liitokseksi. Aurinkokennon pn-liitos on optimoitu tuottamaan sähköenergiaa Auringon säteilyenergiasta. [14, s. 82][18, s. 221]

2.2 Moniliitosaurinkokennot

Moniliitosaurinkokenno muodostuu kahdesta tai useammasta puolijohdemateriaaleista koostuvista liitoksista, joilla on erisuuret energia-aukot. Usean liitoksen avulla mo-

niliitosaurinkokennoilla voidaan saavuttaa korkeampia hyötysuhteita kuin yksiliitosaurinkokennoilla. Moniliitosaurinkokennoja valmistetaan pääosin ryhmien III–V puolijohdemateriaaleista muun muassa molekyyliisuihkuepitaksiakasvatuksella (MBE), metallo-orgaanisella kemiallisella kaasufaasipinnoituksella (MOCVD) ja metallo-orgaanisella kaasufaasi epitaksialla (MOVPE). [20, s. 9–12]

Kuvassa 1 on esitetty kolmiliitosaurinkokennon poikkileikkaus, jossa energia-aukoiltaan erisuuruiset liitokset absorboivat energioiltaan erisuuruisia fotoneja. Liitokset on kasvatettu substraatin päälle ja erotettu toisistaan tunneliliitoksilla. Aurinkokennon taka- ja etupuolella on metallikontaktit, joiden avulla aurinkokenno kytketään aurinkopaneeliksi. Aurinkokennon päällä on heijastuksenestopinnoite (ARC), joka estää valon heijastumista aurinkokennon pinnasta ja lisää valon absorptiota aurinkokennon aktiivisilla alueilla. [20, s. 12–14]



Kuva 1. Tyypillisen kolmiliitosaurinkokennon rakenne. Perustuu lähteeseen [3, s. 13].

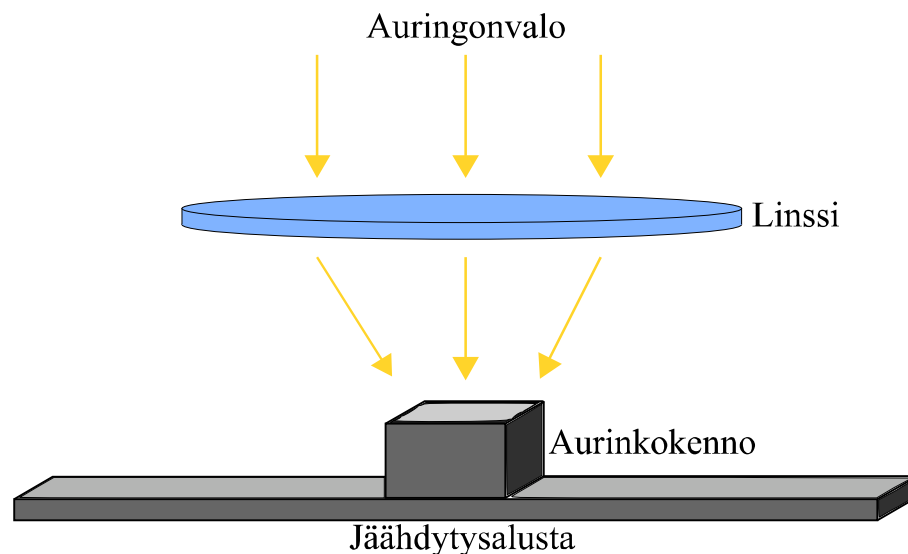
Moniliitosaurinkokennossa pyritään jakamaan Auringon säteily spektri eri osiin siten, että spektrin eri osat absorboituvat aurinkokennon eri liitoksissa. Jokainen liitos optimoidaan tietylle aallonpituusvälille maksimi hyötysuhteen saavuttamiseksi. Tavoitteena on sovittaa yhteen sellaiset materiaalit ja niiden energia-aukot, että Auringon säteily spektristä tulisi hyödynnettyä mahdollisimman suuri osuus. [20, s. 12–13]

III-V puolijohde moniliitosaurinkokennoissa päällimmäisen liitoksen täytyy olla energia-aukoltaan suurin ja alimmaisesta liitoksen energia-aukoltaan pienin, jotta fotoneja voisi absorboitua jokaisessa liitoksessa [14, s. 319–320][20, s. 13–14]. Absorboituneet fotonit muodostavat varauksenkuljettajia, mikä aiheuttaa sähkövirran. Kolmiliitosaurinkokennossa päällimmäinen liitos voi muodostua esimerkiksi galliumindiumfosfidista (GaInP), jonka energia-aukko on tyypillisesti noin 1,9 eV, jolloin liitoksessa absorboituvat fotonit,

joiden energia on 1,9 eV tai suurempia. Keskimäinen liitos voi olla galliumarsenidia (GaAs), jonka energia-aukko on noin 1,42 eV, jolloin liitoksessa absorboituvat fotonit joiden energia on 1,42–1,9 eV. Alimmassa liitoksessa absorboituvat vähäenergiset fotonit, joiden energia voi olla 0,7–1,42 eV liitoksen ollessa germaniumia (Ge). Moniliitosaurinkokennojen liitokset voivat muodostua useista erilaisista materiaalikombinaatioista. [3, s. 13–16][20, s. 13–14]

2.3 Auringonvaloa keskittävä optiikka

Auringonvaloa keskittävän optiikan eli linssin tai peilin avulla aurinkokennojen hyötysuhdetta voidaan nostaa entisestään [14, s. 314][28]. CPV-tekniikan keskeisenä periaatteena on kustannustehokkaan valoa keskittävän optiikan käyttäminen, mikä mahdollistaa sen, että aurinkokennojen pinta-alaa voidaan pienentää, jolloin aurinkokennojen valmistamisesta koituvat materiaalikustannukset pienenevät. Pienempien valmistuskustannuksien vuoksi CPV-tekniikka edesauttaa kalliimpien aurinkokennoteknologioiden kilpailukykyä. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettuna aurinkokennolle auringonvaloa keskittävän linssin periaate. [14, s. 123][16, s. 6][20, s. 25]



Kuva 2. CPV-aurinkokenno, jossa auringonvaloa keskittävä linssi keskittää linssille saapuvan auringonvalon pienemmälle pinta-alalle aurinkokennon pinnalle. Perustuu lähteeseen [3, s. 21].

Auringonvaloa keskittävän linssin konsentraatiokerroin voi olla jopa 2000 [20, s.85]. Konsentraatiokerroin ilmaisee kuinka moninkertaiseksi linssi voi keskittää sille saapuvan auringonvalon intensiteetin [16, s. 6]. CPV-teknologioita, joiden konsentraatiokerroin on alle 100, kutsutaan matalan konsentraatiokertoimen aurinkosähköteknologioiksi (LCPV) ja yli 100 konsentraatiokertoimen CPV-teknologioita korkean konsentraatiokertoimen aurinkosähköteknologioiksi (HCPV) [16, s. 7]. Amerikkalaisen materiaalien ja testauksen standardointi yhdistyksen (ASTM) ja kansainvälisen sähköteknisen komission (IEC) mukaan yhden auringon valon intensiteetti on 1000 W/m^2 , mikä tarkoittaa sitä, että linssillä,

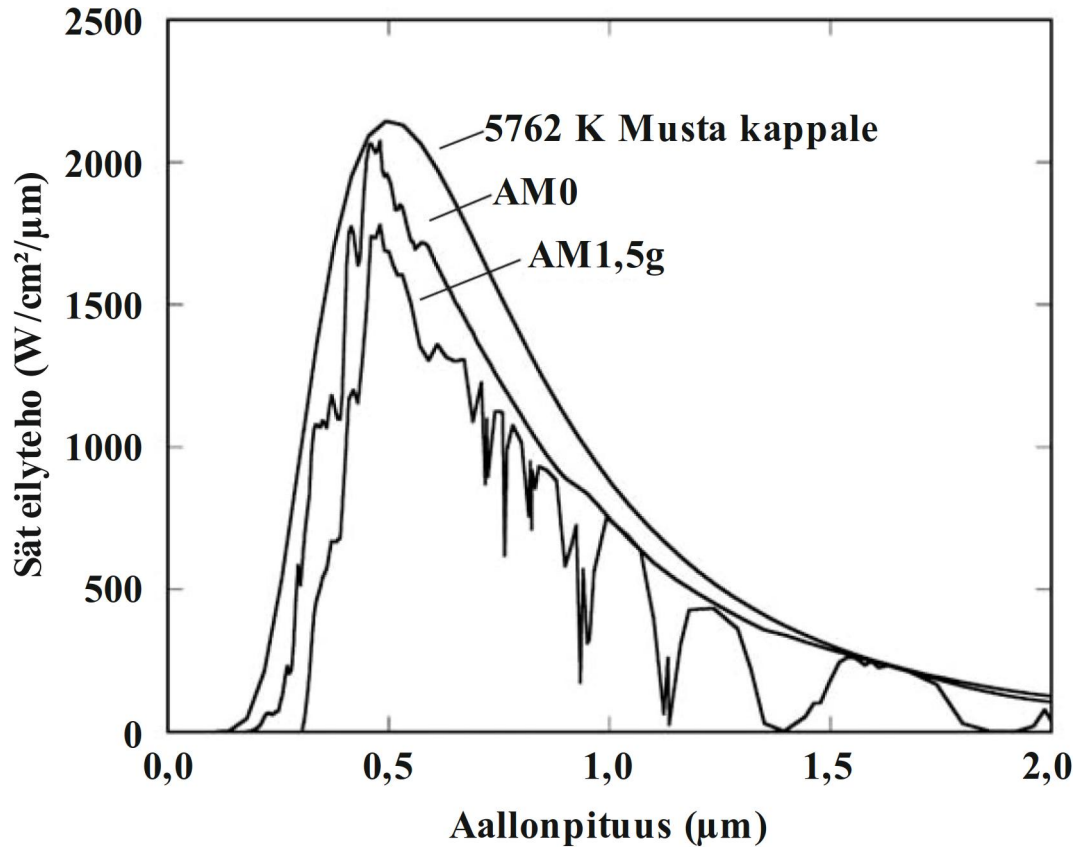
jonka konsentraatiokerroin on 300, voidaan saavuttaa 300 kW/m^2 valon intensiteetti [14, s. 799][20, s. 61–62].

Korkean hyötysuhteen moniliitosaurinkopaneeli asennetaan usein aurinkoseuraimiin. Aurinkoseurain suuntaa aurinkopaneelin aurinkoon nähden kohtisuorasti, jotta aurinkopaneeli tuottaisi suurimman mahdollisen tehon päivän jokaisena hetkenä. HCPV-tekniologioiden yhteydessä käytetään tyypillisesti kahden akselin aurinkoseuraimia, kun taas LCPV-tekniologioiden yhteydessä voidaan käyttää kaksi- tai yksiakselisia aurinkoseuraimia. [16, s. 6]

Auringonvaloa keskittävä optiikka toteutetaan usein Fresnel-linssin avulla, koska Fresnel-linssit ovat rakenteeltaan kevyitä ja kompakteja. Fresnel-linssien optiset ominaisuudet ovat kilpailukykyisiä ja valmistuskustannukset pieniä verrattuna muihin linssitekniologioihin [20, s. 95–98]. Muita auringonvaloa keskittäviä tekniikoita ovat muun muassa paraboliset peilit, heliostaatit, ensiö- ja toisiolinssistä muodostuvat optiikat, sekä muut rakenteeltaan erilaiset linssi- ja peili optiikat, kuten kouru-, yhdisteparaboloidi-, hyperboloidi- ja kupolioptiikat [20, s. 85].

2.4 Auringon säteilyspektri

Maahan saapuvan Auringon säteilyn teho on esitetty kuvassa 3 pinta-alayksikköä kohti aallonpituuden funktiona. 5762 K asteisen mustan kappaleen säteilyspektri kuvaa Auringon emittoimaa säteilyä Auringon pintalämpötilan ollessa 5762 K. Ilmamassalla AM kuvataan Maan ilmakehän vaikutusta Auringon säteilyn spektriin. Maan yläilmakehän saavuttavaa Auringon säteilyn jakaumaa kuvataan ilmamassan säteily spektrillä AM0. Aurinkovakio, eli Auringon säteilyn teho avaruudessa Maan yläilmakehän ulkopuolella on noin 1367 W/m^2 . Maan pinnalla Auringon säteilyn teho on kuitenkin tätä pienempi, sillä ilmamassan arvo Maan pinnalla on yhtä suuri tai suurempi kuin 1. Kuvassa 3 esitetään myös Maan pinnalla oleva AM1.5g säteilyspektri, joka sisältää sekä suoran että epäsuoran Auringon säteilyn. AM1.5d säteilyspektri sisältää vain suoran Auringon säteilyn. Käytetystä teknologiasta riippuen aurinkopaneelien suorituskykyä vertaillaan usein AM1.5g tai AM1.5d säteilyspektrille altistettuna standardisoidussa testiolosuhteessa (STC). [14, s. 83, 798]

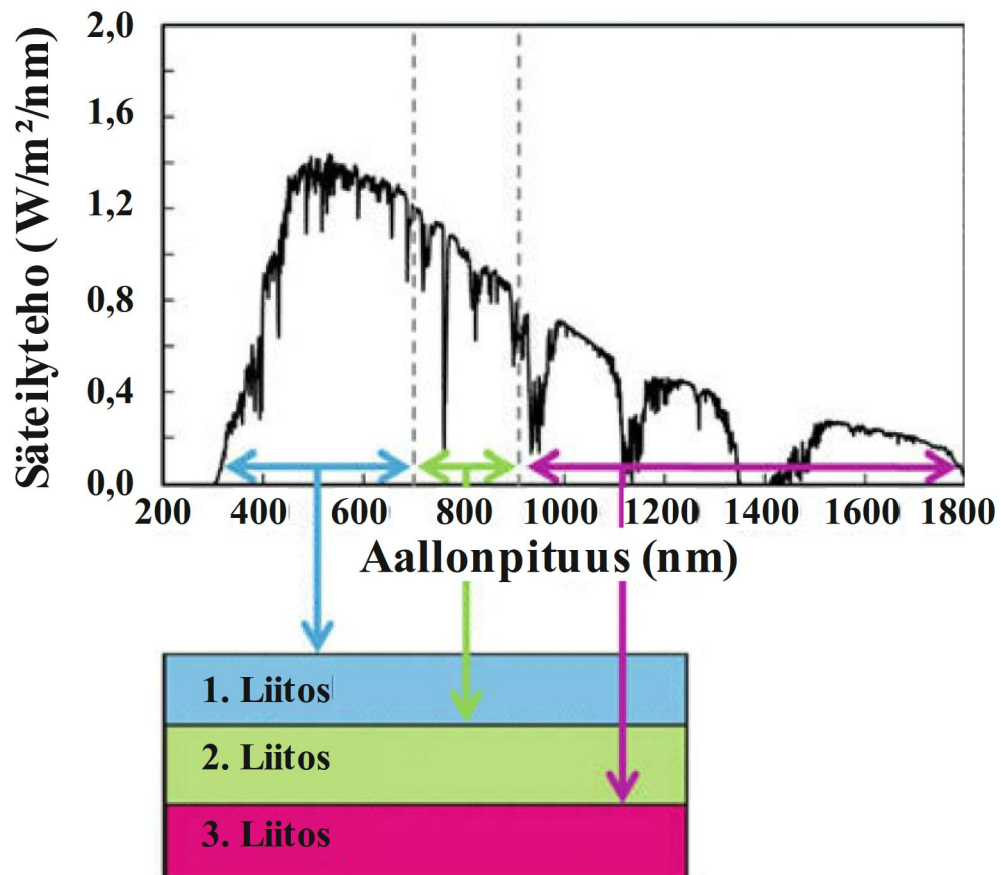


Kuva 3. 5762 K asteisen mustan kappaleen säteilyspektrin, sekä AM0 ja AM1.5g säteilyspektrien teho pinta-alayksikköä kohti aallonpituuden funktiona. Perustuu lähteeseen [14, s. 84].

Aurinkokennojen toiminta perustuu Auringon spektrin tehokkaaseen hyödyntämiseen. Moniliitosaurinkokennoilla Auringon säteilyspektristä saadaan hyödynnettyä tehokkaammin suurempi osa sähköenergiaksi kuin yksiliitosaurinkokennoilla. Auringon säteilyenergiasta aiheutuvaa lämpötilan nousua aurinkokennossa saadaan myös minimoitua, kun suuri osa Auringon säteilyn energiasta saadaan muunnettua sähköenergiaksi. Kuvassa 4 kolmiliitosaurinkokennon päällimmäinen liitos absorboi Auringon säteilyn lyhyimmät aallonpituudet ja alimmainen liitos pisimmät aallonpituudet. Auringon säteily koostuu fotoneista, joiden energia on kääntäen verrannollinen aallonpituuteen kaavan (1) mukaisesti

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

missä E_{λ} on fotonin energia, h Plankin vakio, c valon nopeus ja λ aallonpituus [14, s. 82][18, s. 224]. Tämä tarkoittaa sitä, että kuvan 4 kolmiliitosaurinkokennossa päällimmäinen liitos absorboi energeettisimmät fotonit. Lyhyen aallonpituuden omaavien fotonien hyödyntäminen on siis tärkeämpää kuin pitempiä aallonpituuksia omaavien fotonien hyödyntäminen. [20, s. 13]

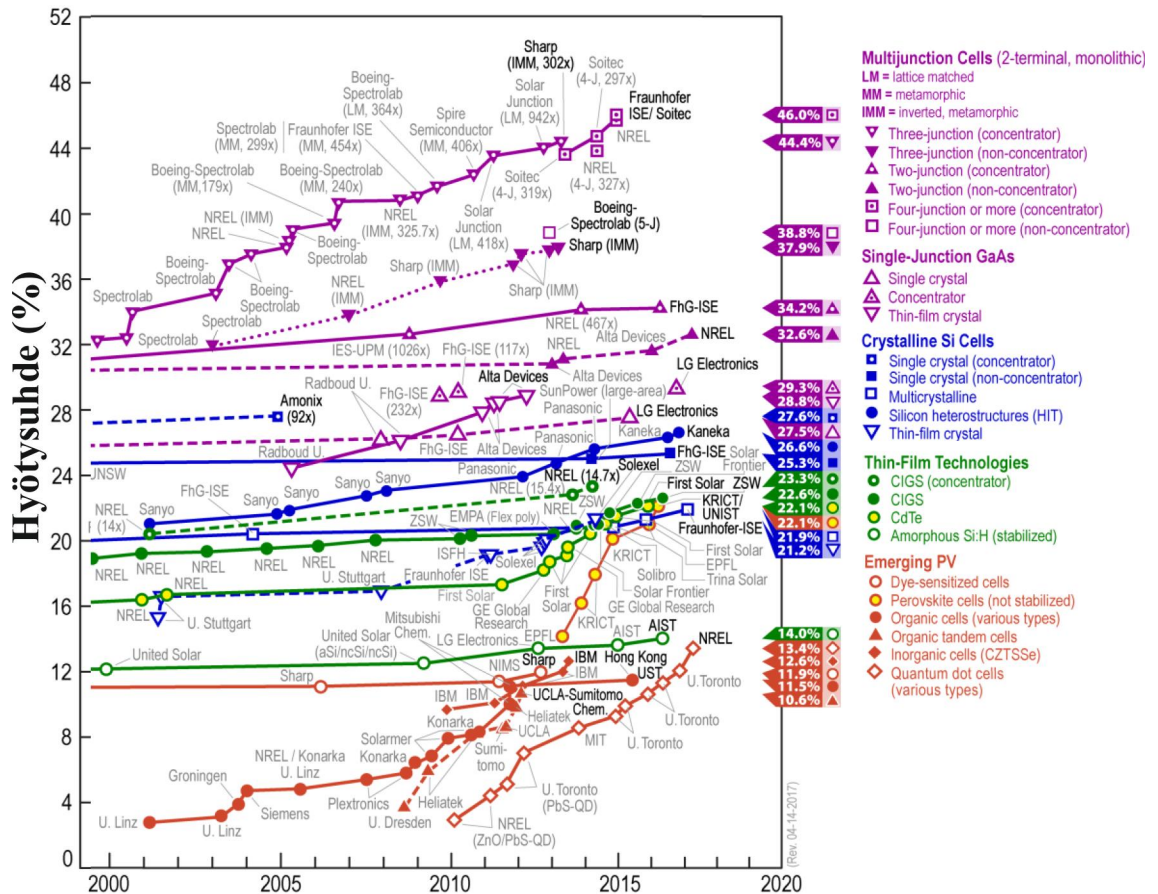


Kuva 4. Auringonsäteilyn spektri AM1.5d jakautuu aallonpituuksiltaan eri osiin, jotka absorboituvat kolmiliitosaurinkokennon eri liitoksissa. Perustuu lähteeseen [20, s. 13].

Pitkillä aallonpituuksilla fotonien energia voi olla niin pieni, että ne eivät pysty virittämään elektroneita valenssivyöltä johtavuusvyölle moniliitosaurinkokennon alimman liitoksen energia-aukon ollessa esimerkiksi 0,7 eV suuruusluokkaa. Pienienergisiä fotoneja voidaan yrittää hyödyntää lisäämällä moniliitosaurinkokennoon energia-aukoltaan pienempiä liitoksia. [20, s. 13–14]

2.5 Aurinkokennojen hyötysuhteet

Aurinkokennojen toiminta perustuu Auringon sähkömagneettisen säteilyn hyödyntämiseen. Aurinkokennojen yhteydessä hyötysuhteella tarkoitetaan sitä kuinka paljon Auringon säteilyn energiaa aurinkokenno voi muuttaa sähköenergiaksi [14, s. 113]. Kuvassa 5 on esitetty 2000-luvulla eri aurinkokennoteknologioilla saavutetut suurimmat hyötysuhteet.



Kuva 5. Aurinkokennoteknologiat ja niiden suurimmat saavutetut hyötysuhteet 2000-luvulla. Perustuu lähteeseen [22].

Kuvasta 5 nähdään, että erilliskiteisellä piiaurinkokennolla on saavutettu 27,6 % hyötysuhde ja monikiteisellä piiaurinkokennolla 21,9 % hyötysuhde. Neljän liitoksen CPV-moniliitosaurinkokennolla on saavutettu tähän mennessä suurin hyötysuhde 46 % ja suurin kolmiliitosaurinkokennolla saavutettu hyötysuhde on 44,4 %. Moniliitosaurinkokennoilla saavutetaan todennäköisesti 50 % hyötysuhde lähivuosina. [14, s. 318][20, s. 2, 243]

Kaupallisten aurinkokennojen hyötysuhteet ovat tyypillisesti alhaisempia, kuin yksittäisten tutkimuskäyttöön valmistettujen aurinkokennojen hyötysuhteet. Pääsääntöisesti kaupallisissa valmistusprosesseissa ei saavuteta yhtä suuria laadullisia ominaisuuksia, koska valmistusprosessin nopeus ja hinta ovat määrääviä tekijöitä. Lisäksi aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat hieman matalampia kuin yksittäisten aurinkokennojen hyötysuhteet, sillä aurinkopaneeleissa on suuremmat resistiiviset häviöt, suhteellisesti vähemmän hyödynnettyä pinta-alaa, optisia häviöitä ja aurinkokennojen yhteensopimattomuushäviöitä. Korkean hyötysuhteen aurinkokennoista koostuvan aurinkopaneelin hyötysuhde voi olla jopa 10 % pienempi, kuin yksittäisen aurinkokennon hyötysuhde. Suurin CPV-aurinkopaneelilla saavutettu hyötysuhde on 38,9 %. [14, s. 301][16, s. 5][20, s. 242–244]

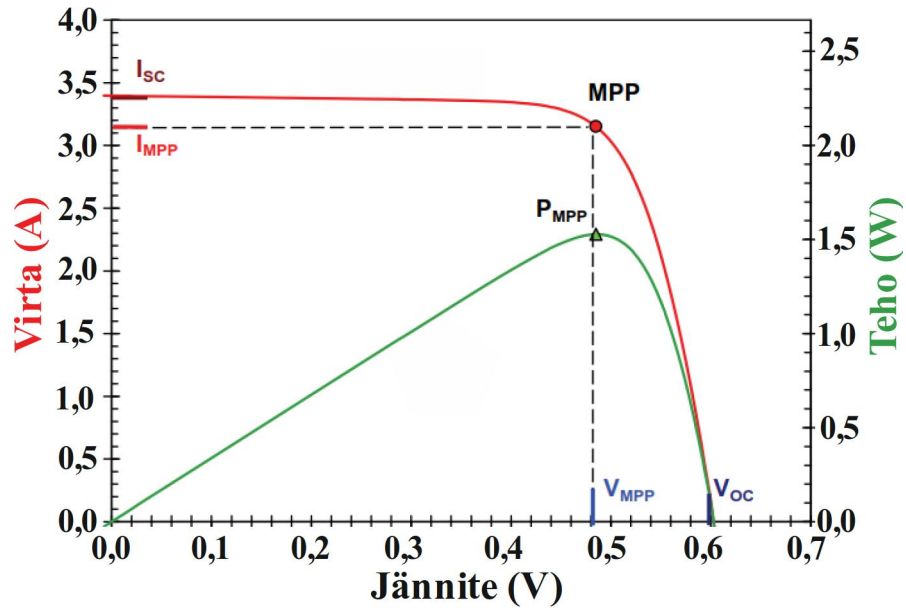
Yksiliitoksisilla aurinkokennoilla suurin teoreettinen hyötysuhde on 31 % lämpötilassa 25 °C konsentraatiokertoimella 1. Teoreettinen maksimihyötysuhde nousee 86,6 % lämpötilassa 25 °C, mikäli aurinkokennossa olisi ääretön määrä liitoksia ja konsentraatiokerroin olisi 46 300, joka on Maassa kuvantavan optiikan avulla suurin saavutettavissa oleva konsentraatiokerroin. [20, s. 10–11]

Hyötysuhteen nostaminen liitoksien määrää lisäämällä ei ole kuitenkaan yksinkertaista, sillä liitosten määrän kasvaessa hyötysuhteen nousu on maltillisempaa. Lisäksi useampien liitoksien lisääminen monimutkaistaa aurinkokennon valmistusprosessia ja voi lisätä valmistusprosessista koituvia kustannuksia. On jopa väitetty, että liitoksien määrän lisäämisellä saavutettu suurempi hyötysuhde hyöty jää kannattamattomaksi nykYTEknologialla valmistusprosessin monimutkaistuessa, kun moniliitosaurinkokennossa on enemmän kuin 5 tai 6 liitosta. [20, s. 243]

Edellä esitettyjen teoreettisten maksimihyötysuhteiden ja eri aurinkokennoteknologioilla saavutettujen todellisten maksimihyötysuhteiden välillä on merkittävä ero, sillä suuri osa Auringon säteilyn tehosta menetetään erilaisten häviöiden muodossa. Kaikkia aurinkokennolle saapuvia fotoneja ei välttämättä saada muunnettua elektroni-aukkopareiksi ja kerättyä metallijohtimille sähkövirraksi. Metallijohtimilta kerättyjen varauksenkuljettajien ja tulleiden fotonien suhdetta kuvastaa ulkoinen kvanttihyötysuhde (EQE). Kvanttihyötysuhde on tyypillisesti pienempi kuin 1 ja se kuvastaa aurinkokennolta siirtyvien elektronien määrää aurinkokennolle saapuvien fotonien suhteen. Auringonvaloa keskitävä optiikka ja aurinkokennon resistiiviset kontaktit ja liitokset aiheuttavat myös häviöitä hyötysuhteeseen. [20, s. 10–15]

2.6 Aurinkokennojen sähköinen käyttäytyminen

Aurinkokennon maksimiteho ja hyötysuhde ovat usein kiinnostavimpia sähköisiä parametreja, joiden avulla voidaan ennakoida aurinkokennon tuottamaa energian määrää. Aurinkokennon maksimitehopisteen teho P_{MPP} voidaan esittää kuvan 6 tapaan PV -käyrän eli teho-jännite-käyrän avulla, jossa aurinkokennon tuottama teho P on esitetty aurinkokennon jännitteen V funktiona. Aurinkokennon virta I jännitteen V funktiona eli IV -käyrä, joka on niin ikään esitetty kuvassa 6, on myös keskeisessä osassa tarkasteltaessa aurinkokennon sähköistä käyttäytymistä. IV -käyrän avulla voidaan esittää aurinkopaneelin oikosulkuvirta I_{SC} , avoimen piirin jännite V_{OC} ja täyterroin FF . [12, s. 89-91][20, s. 119-120]



Kuva 6. Pinta-alaltaan 102 cm^2 kokoisen yhden erilliskiteisen piiaurinkokennon virta I ja teho P jännitteen V funktiona STC-olosuhteessa. Perustuu lähteseen [12, s. 90].

Täyterroin kuvaa IV -käyrän muotoa ja se ilmoittaa maksimitehopisteessä (MPP) olevan jännitteen ja virran tulon oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen tulon suhteen, kaavan (2) mukaisesti

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_{MP}}{V_{oc} I_{sc}}, \quad (2)$$

missä FF on täyterroin, V_{MP} maksimitehon jännite, I_{MP} maksimitehon virta ja P_{MP} maksimiteho. Täyterroin on todellisissa aurinkokennoissa arvoltaan aina pienempi kuin yksi. [14, s. 113]

Valon intensiteetti on suurin aurinkokennon käyttäytymiseen vaikuttava tekijä, sillä aurinkokennon maksimiteho riippuu vahvasti valon intensiteetistä [20, s. 116, 121]. Aurinkokennon oikosulkuvirran suuruus on myös suoraan verrannollinen valon intensiteetin määrään. Oikosulkuvirta nousee suoraan verrannollisesti myös konsentraatiokertoimen kasvaessa [14, s. 123]. Oikosulkuvirran nousu vaikuttaa hieman avoimen piirin jännitteeseen, sillä aurinkokennon avoimen piirin jännite nousee logaritmisesti oikosulkuvirran noustessa [14, s. 115].

Lämpötilalla on myös vaikutusta aurinkokennon sähköiseen toimintaan. Lämpötilan noustessa aurinkokennon avoimen piirin jännite pienenee, koska aurinkokennoissa muodostuvat saturaatiovirrat kasvavat [14, s. 122][20, s. 122]. Lämpötilan noustessa aurinkokennojen liitoksien energia-aukko pienenee, mistä seuraa myös maltillinen oikosulkuvirran nousu. Oikosulkuvirta nousee hieman, sillä korkeammassa lämpötilassa useammilla fotoneilla on riittävästi energiaa virittää elektroniaukkopari kaventuneen energia-aukon yli. [4][14, s. 123]

Tuulen voimakkuus ja suunta voi vaikuttaa aurinkopaneelien lämpötilaan. Tuulen puhaltaessa aurinkopaneelin takaa viilentää se aurinkopaneelia, mikä nostaa aurinkopaneelin hyötysuhdetta. CPV-aurinkopaneeleissa voimakkaat tuulen muutokset voivat kuitenkin aiheuttaa tärähdyksiä aurinkoseuraimen ja kulmamuuotoksia optiikkaan. [20, s. 125]

2.7 CPV-teknologian hyödyt ja haasteet

Moniliitosaurinkokennojen keskeinen hyöty yksiliitosaurinkokennoihin verrattuna on niillä saavutettavat korkeat hyötysuhteet. III-V moniliitosaurinkokennot eivät myöskään ole yhtä voimakkaasti lämpötilariippuvaisia kuin erilliskide tai monikide piiaurinkokennot. Tästä syystä moniliitosaurinkopaneelien käyttö sopiikin hyvin ilmastoltaan kuumille alueille. Aurinkoseuraimen asennettuna CPV-aurinkopaneelit tuottavat tasaisesti sähköä aamusta iltaan auringon paistaessa. Muita CPV-aurinkopaneelien hyötyjä ovat modulaarisuus, suuri energiatiheys, pieni asennuspinta-alan tarve, pieni puolijohdemateriaalien tarve ja alhaiset pääomakustannukset. [16, s. 6][20, s. 2]

CPV-teknologioiden haasteita ovat muun muassa aurinkoseuraimen akselimoottorien tarve, optiikan puhdistustarve, optiset hyötysuhdehäviöt, piiaurinkokennojen halpa hinta ja teknologian puutteellinen standardisointi. Yhtenä haasteena on myös CPV-teknologioiden rajoittunut epäsuoran auringonvalon hyödyntäminen, jonka osuus on kuitenkin tyyppillisesti vain noin 10–20 % aurinkopaneelille saapuvan valon määrästä. Aurinkoseuraimella varustetut CPV-aurinkopaneelit eivät ole myöskään kovin helposti asennettävissä rakennusten kalteville katoille. [14, s. 799–800][16, s. 6][20, s. 3–5]

Hinnoittelu aurinkopaneelimarkkinoilla on äärimmäisen tiukkaa. CPV-aurinkopaneelien onkin hyvin vaikea vastata piiaurinkopaneelien vuosi vuodelta laskeviin hintoihin. CPV-aurinkopaneelien kokonaishinta muodostuu useista eri tekijöistä, kuten optisista laitteista ja aurinkoseuraimesta. Kokonaishinnan laskemiseen on kuitenkin vielä potentiaalia. Piiaurinkopaneeliteknologiat ovat saavuttaneet hyvin luotettavan vaiheen, sillä piiaurinkopaneeleita on kehitetty jo kymmenien vuosien ajan, kun taas CPV-teknologia on varhaisemmassa kehitysvaiheessa. CPV-aurinkopaneelien pitkäaikaisesta luotettavuudesta ja historiallisesta mittausdatasta tarvittaisiin enemmän näyttöä kilpailukyvyyn edistämiseksi. Moniliitoksisilla CPV-aurinkopaneeleilla on kuitenkin suurempi potentiaali nostaa edelleen maksimihyötysuhdettaan kuin yksiliitoksisilla aurinkopaneeleilla. CPV-teknologian ennusteet ovat optimistisia ja sen markkinaosuuden odotetaan kasvavan nopeasti lähivuosina. [16, s. 6][20, s. 3–5]

3. AURINKOPANEELIN SIMULAATIOMALLI

Aurinkokennojen ja aurinkokennoista muodostuvien aurinkopaneelien piirimallit perustuvat matemaattisiin malleihin, joissa aurinkokennojen sähköistä toimintaa mallinnetaan kirjallisuudesta tunnettujen yksinkertaistettujen kaavojen avulla. Kaavojen takana oleva teoria perustuu paikoin monimutkaisiinkin puolijohdefysiikan ja kiinteän olomuodon fyysiikan lainalaisuuksiin. Yksinkertaistettujen kaavojen perusteella aurinkokennojen sähköistä toimintaa voidaan kuitenkin mallintaa riittävän tarkasti, siten että piirimalleilla toteutetut simulaatiot vastaavat todellisilla aurinkokennoilla ja aurinkopaneeleilla tehtyjen mittausten tuloksia. [14, s. 111–120]

3.1 Kolmiliitosaurinkokennon piirimalli

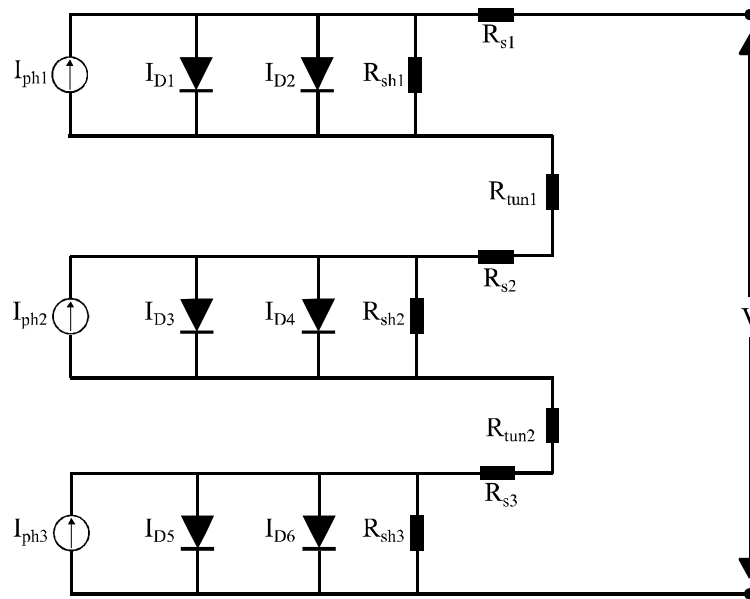
Aurinkokennoille tunnusomainen IV -käyrä eli virta-jännite-käyrä voidaan ratkaista kaavan (3) avulla. Kaavan (3) mukaan aurinkokennon kokonaisvirta I muodostuu aurinkokennon tuottamasta häviöttömästä oikosulkuvirrasta I'_{SC} , josta vähennetään kvasi-neutraaleilla alueilla syntyvät virtahäviöt, tyhjennysalueella syntyvät virtahäviöt ja rinnan ja sarjaan kytkeytyvistä resistiivisistä liitoksista syntyvät virtahäviöt. [14, s.111–120]

$$I = I'_{SC} - I_{o1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{2kT}} - 1 \right) - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (3)$$

Kaavassa (3) I_{o1} tarkoittaa saturaatiovirran suuruutta kvasi-neutraaleilla alueilla, I_{o2} saturaatiovirran suuruutta tyhjennysalueella, R_s sarjaan kytkeytyviä resistiivisiä häviöitä ja R_{sh} rinnan kytkeytyviä resistiivisiä häviöitä. Lisäksi kaavassa (3) T on lämpötila kelvinateikolla, q on alkeisvaraus ja k on Boltzmannin vakio. Moniliitosaurinkokenno muodostuu piirimalli tasolla ikään kuin useammasta sarjaan kytketystä yksiliitoksisesta aurinkokennosta, jolloin jokaista moniliitosaurinkokennon liitosta voidaan mallintaa erikseen kaavan (3) mukaisesti. Resistiivisistä liitoksista kytkeytyvät virtahäviöt, sekä virtahäviöt kvasi-neutraaleilla alueilla ja tyhjennysalueella muodostuvat moniliitosaurinkokennossa samalla periaatteella kuin yksiliitoksisessa aurinkokennossakin. Häviöiden suuruus voi kuitenkin olla eri suuruusluokkaa.

Kolmiliitosaurinkokenno koostuu kolmesta virtaa tuottavasta liitoksesta ja niiden välissä olevista tunneliliitoksista kuvan 7 mukaan. Kuvan 7 piirimallissa virtalähteet I_{ph} mallintavat liitosten tuottamaa virtaa ja liitoksilla olevat diodit I_D mallintavat tyhjennysalueilla ja kvasi-neutraaleilla alueilla syntyviä saturaatiovirtoja. Vastukset R_{sh} mallintavat liitosten rinnalla olevia resistiivisiä häviöitä ja vastukset R_s mallintavat sarjaan kytkeytyviä resistiivisiä häviöitä. [10][20, s. 23][21]

Sarjaan kytkeytyvät resistiiviset häviöt R_s muodostuvat pääosin aurinkokennon puolijohdemateriaalien resistiivisyydestä ja aurinkokennon metallisista kontakteista, kuten aurinkokennon pinnalla olevista kontaktisormista. Kun taas esimerkiksi valmistusprosessissa aiheutuneet viat voivat vaikuttaa aurinkokennon rinnalla oleviin resistiivisiin häviöihin R_{sh} . Parhaassa tapauksessa aurinkokennon rinnalla oleva vastus R_{sh} on mahdollisimman suuri ja aurinkokennon kanssa sarjassa oleva vastus R_s on mahdollisimman pieni. Toisinaan ideaalista aurinkokennoa mallinnettaessa R_{sh} asetetaan äärettömän suureksi ja R_s nolllaksi, jolloin aurinkokennossa ei huomioida näitä resistiivisiä häviöitä. [14, s. 120][20, s. 23][31]

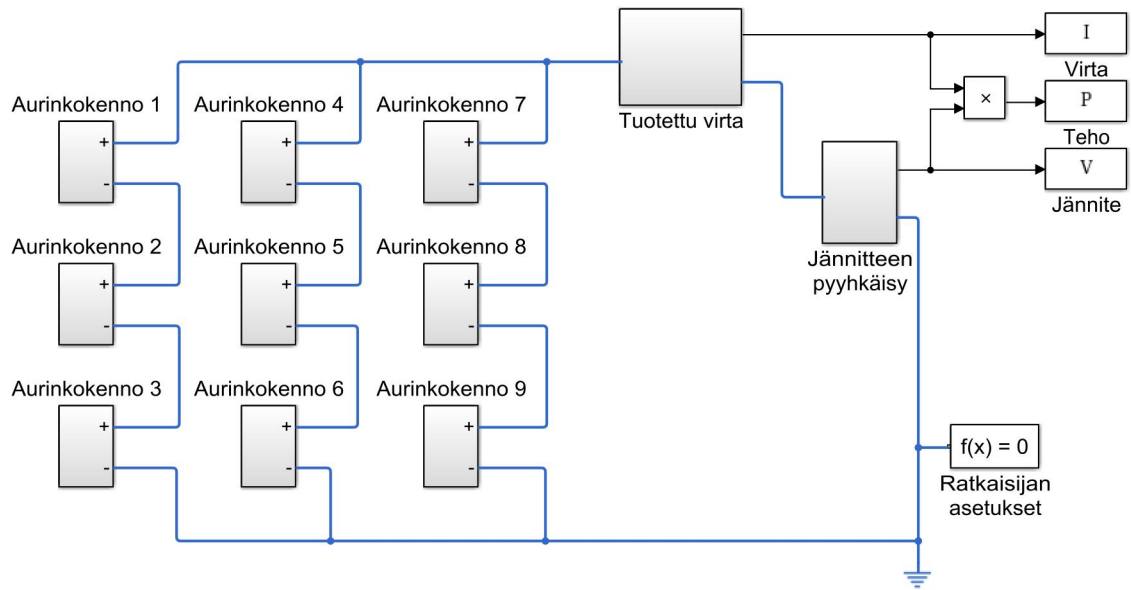


Kuva 7. Kolmiliitosaurinkokennon yksinkertaistettu piirimalli. Perustuu lähteisiin [10][20, s. 23][21].

Moniliitosaurinkokennon piirimalli eroaa perinteisen piiaurinkokennon piirimallista liitoksien muodostaman kerrosmaisena rakenteensa vuoksi. Moniliitosaurinkokennon piirimallissa virtalähteitä I_{ph} on yhtä monta kuin moniliitosaurinkokennossa on liitoksia. Yksiliitoksisen aurinkokennon piirimallissa virtalähteitä on vain yksi. Moniliitosaurinkokennojen piirimalliin voidaan myös merkitä liitoksien välissä olevat resistiivisiä häviöitä aiheuttavat tunneliliitokset R_{tun} . Kuvan 7 kolmiliitosaurinkokennon piirimallissa on kaksi tunneliliitosta jokaisen kahden liitoksen välissä.

3.2 Aurinkopaneelin Simulink-simulaatiomalli

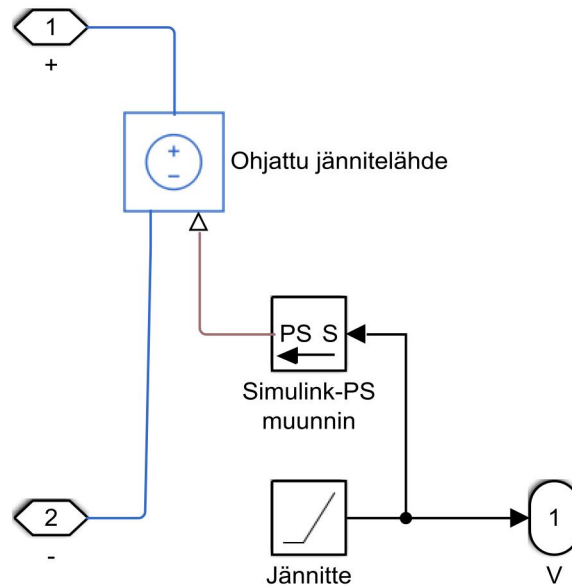
Diplomityössä toteutettiin aurinkopaneelin simulaatiomalli Matlab/Simulink-ohjelmistolla. Kyseinen aurinkopaneeli on esitetty kuvassa 8 ja se koostui yhteensä yhdeksästä kolmiliitosaurinkokennosta. Aurinkopaneeli muodostui kolmesta rinnankytketystä kolmiliitosaurinkokennorivistä, jossa jokaisessa rivissä oli kolme sarjaan kytkettyä kolmiliitosaurinkokennoa. [19][29]



Kuva 8. Yhdeksästä aurinkokennosta muodostuvan aurinkopaneelin simulaatiomalli Simulink-ympäristössä.

Aurinkopaneelin simulaatiomallissa käytettiin pääosin Simulinkin Simscape-kirjastosta löytyviä komponentteja. Simscape-komponenttien avulla on mahdollista luoda fyysisiä kytkentöjä mallintavia piirejä, jotka helpottavat monimutkaisten kokonaisuuksien simulaatioita. Simulinkin Simscape-komponenteilla luodut piirit vaativat aina yhden lohkon, jossa asetetaan simulaation ratkaisijan asetukset. Tämä lohko on näkyvässä kuvan 8 oikeassa alareunassa. Ratkaisijan oletusasetukset olivat sopivat aurinkopaneelin simulaation suorittamiseksi. [17][19][24][26]

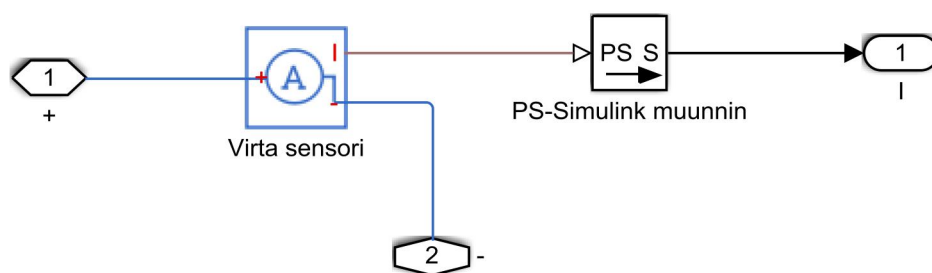
Aurinkopaneelin simulaatiossa jännitettä nostettiin nolasta ylöspäin 0,01 V askelissa. Jännitteen portaittainen nosto voidaan aloittaa myös negatiivisesta arvosta, esimerkiksi -2 V:sta, jos halutaan tarkastella aurinkopaneelin IV -käyrää negatiivisilla jännitteen arvoilla. Jännitettä voidaan nostaa myös pienemmillä askelilla kuin 0,01 V, mikäli simulaation tuloksia halutaan tarkentaa. Tällöin simulaation suorittamiseen kuluva aika on kuitenkin suurempi. Kuvan 8 jännitteen pyyhkäisy –lohkon sisältö on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Jännitteen pyyhkäisy -lohkon sisältö aurinkopaneelin Simulink-simulaatiomallissa. Nouseva jännitteen arvo muutettiin Simulink-PS muuntimella fyysiseksi signaaliksi aurinkopaneelin plus ja miinus napojen välille.

Kuvan 9 jännitteen pyyhkäisy -lohkossa jännitteelle asetettiin haluttu alkuarvo ja porrastus. Simulink-PS muunnin operaatio muuttaa numeerisessa muodossa olevan jännitesignaalin Simscape ympäristöön sopivaksi fyysiseksi signaaliksi ja ohjattu jännitelähde ylläpitää jännitteelle asetettua arvoa aurinkopaneelissa.

Aurinkopaneelin tuottama kokonaisvirta laskettiin kuvassa 8 näkyvässä tuotettu virta -lohkossa. Kuvassa 8 olevan tuotettu virta -lohkon sisältö on esitetty kuvassa 10, jossa aurinkopaneelin tuottama kokonaisvirta lasketaan jokaisella jännitteen arvolla.



Kuva 10. Tuotettu virta -lohkon sisältö aurinkopaneelin Simulink-simulaatiomallissa. Virta mitattiin aurinkopaneelin plus ja miinus napojen väliltä ja mitattu virran arvo muutettiin numeeriseksi arvoksi PS-Simulink muuntimella.

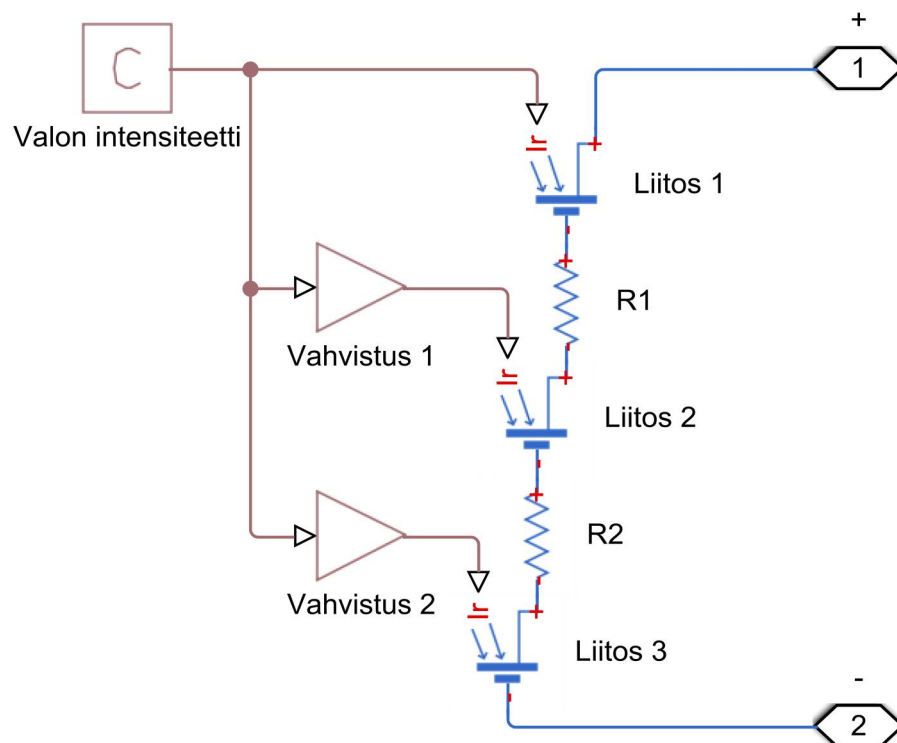
Virta sensorin avulla aurinkopaneelin virta mitattiin jokaisella jännitteen arvolla ja tuloksena saatu kokonaisvirta muutettiin PS-Simulink muuntimen avulla numeeriseen muotoon. Simulaation tuloksena saatiin aurinkopaneelin tuottama virta jokaisella jännitteen

arvolla, jolloin simulaation datapisteistä voitiin muodostaa virta-jännite-käyrä. Simulaation ulostuloon lisättiin myös aurinkopaneelin tuottama teho, joka laskettiin virran ja jännitteen tulona.

Kuvan 8 aurinkopaneelissa aurinkokenno-lohkoissa aurinkokennojen rinnalle asetettiin $1\text{ M}\Omega$ suuruinen vastus, jotta simulaatiomallin simulaation ratkaisu helpottui. Aurinkokennojen rinnalle kytketty vastus helpotti piirin matemaattista ratkaisua, mutta ei suuren vastusarvonsa takia vaikuttanut merkittävästi aurinkopaneelin sähköiseen toimintaan. Rinnakkainen vastus ei ollut tarpeen yksittäisiä aurinkokennoja simuloitaessa.

3.3 Kolmiliitosaurinkokennon Simulink-simulaatiomalli

Yksi kolmiliitosaurinkokenno muodostuu yksinkertaistetusti kolmesta virtaa tuottavasta liitoksesta ja niiden välissä olevista tunneliliitoksista. Yksittäisen kolmiliitosaurinkokennon sarjaan kytkettyjä liitoksia mallinnettiin Simulinkin Simscape kirjastosta saatavissa olevilla aurinkokenno-komponenteilla kuvan 11 mukaisesti. [25]



Kuva 11. Liitoksista 1, 2 ja 3 muodostuvan yhden kolmiliitosaurinkokennon Simulink-simulaatiomalli. Liitoksien välillä ovat tunneliliitokset R1 ja R2 ja liitoksille 2 ja 3 asetettiin valon intensiteetin vahvistus.

Yhden kolmiliitosaurinkokennon Simulink-simulaatiomallissa kolmiliitosaurinkokennolle asetettiin valon intensiteetin arvo, joka vietiin kolmiliitosaurinkokennon jokaiselle liitokselle. Kolmiliitosaurinkokennoissa eri liitokset absorboivat eri määrän energioiltaan erisuuruisia fotoneja, mikä vaikuttaa myös liitosten tuottamaan virtaan [20, s. 13]. Tarkastelun alla olevalla kolmiliitosaurinkokennolla päällimmäinen liitos absorboi hieman

vähemmän fotoneja kuin muut liitokset ja alimmainen liitos absorboi hieman enemmän fotoneja kuin muut liitokset. Edellä mainittu käyttäytyminen huomioitiin simulaatiomallissa kuvassa 11 näkyvillä vahvistusoperaatioilla liitoksen 1 ollessa kolmiliitosaurinkokennon päällimmäinen liitos, liitoksen 2 ollessa kolmiliitosaurinkokennon keskimäinen liitos ja liitoksen 3 ollessa kolmiliitosaurinkokennon alimmainen liitos. Keskimmaiselle liitokselle saapuvalle valon intensiteetille asetettiin 5 % vahvistus ja alimmaiselle liitokselle saapuvalle valon intensiteetille asetettiin 10 % vahvistus.

3.4 Kolmiliitosaurinkokennon tunnusluvut

Aurinkopaneelien ja aurinkokennojen simulaatiomallien täytyy perustua mittauksiin, jotta niillä voitaisiin simuloida mahdollisimman tarkasti todellisen aurinkopaneelin tai aurinkokennon sähköistä toimintaa. Aurinkopaneelien ja aurinkokennojen simulaatioihin tarvittavia tunnuslukuja saatiin kokeellisesti mittaamalla kolmiliitosaurinkokennoja teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorin avulla, jossa oli käytössä AM1.5d/g optinen suodatin [27][30]. Tämän vuoksi lähes kaikki tässä työssä tehdyt simulaatiot perustuvat kyseisen kolmiliitosaurinkokennon sähköiseen toimintaan.

Simulaatiomalleissa käytettiin Simulinkin aurinkokenno-komponentin yksinkertaistettua viiden parametrin mallia, jossa aurinkokennon sähköinen käyttäytyminen ratkaistaan tietyllä valon intensiteetillä mitatun oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen avulla. Lisäksi tarvittiin arvio aurinkokennon sarjaresistanssin R_s arvosta, sekä ideaalisuustekijän N arvosta. Simulinkissä kyseinen aurinkokennon viiden parametrin malli noudattaa aurinkokennon yksidiodimallia, jossa saturaatiovirtojen yhteisvaikutus on huomioitu yhdellä ideaalisuustekijän arvolla. [25]

3.4.1 Ideaalisuustekijä

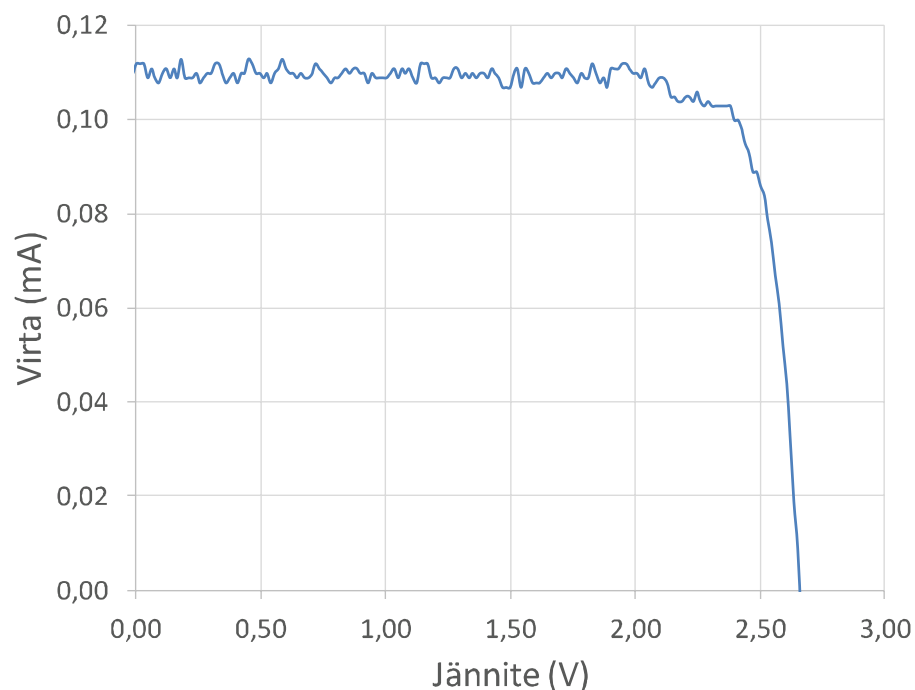
Aurinkokennojen sähköistä toimintaa voidaan simuloida aurinkokennon kaksi- tai yksidiodimalliin perustuvien simulaatiomallien avulla. Simulink-ympäristössä yksi aurinkokenno-komponentti mallintaa yksiliitoksisen aurinkokennon sähköistä käyttäytymistä kaavaa (3) noudattaen, joka perustuu aurinkokennon kaksidiodimalliin [25]. Kaksidiodimallissa olevat diodit mallintavat saturaatiovirtoja tyhjennysalueella ja kvasineutraaleilla-alueilla, jolloin saturaatiovirroissa huomioidaan myös ideaalisuustekijät N_1 ja N_2 . Ideaalisuustekijän arvolle N_1 kvasineutraaleilla-alueilla käytetään usein lukuarvoa 1 ja ideaalisuustekijän arvolle N_2 tyhjennysalueella käytetään usein lukuarvoa 2. Aurinkokennon yksidiodimallissa saturaatiovirtojen yhteisvaikutus huomioidaan yhdellä ideaalisuustekijällä, jonka arvo on tyypillisesti välillä 1–2. [14, s. 121][20, s. 23–24]

Tässä työssä kolmiliitosaurinkokennon liitoksia mallinnettiin Simulinkin aurinkokenno-komponentin viiden parametrin mallilla, joka noudattaa yksidiodimallia. Aurinkokennon yksidiodimalliin perustuvan simulaation ratkaiseminen on Simulinkin ratkaisijalle yksin-

kertaisempaa ja nopeampaa, kuin kaksiodimalliin perustuvan simulaation ratkaiseminen. Yksiodimallissa saturaatiovirrat tyhjennysalueella ja kvasineutraaleilla-alueilla ovat yhdistetty yhdeksi termiksi. Kolmiliitosaurinkokennon yksiodimallissa ideaali-suustekijän arvoksi arvioitiin 1,5. [5]

3.4.2 Oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite

Kolmiliitosaurinkokennoissa liitoksien paksuudet ja energia-aukot täytyy sovittaa yhteen niin, että aurinkokennon tuottama kokonaisvirta olisi mahdollisimman suuri. Kolmiliitosaurinkokennon liitokset pyritään valmistamaan siten, että ne tuottaisivat likimain samansuuruisen virran, sillä liitoksien sarjaan kytkennässä pienimmän virran tuottava liitos rajoittaa koko aurinkokennon tuottamaa virtaa. Simulaatiomalleissa käytetyille aurinkokennoille määritettiin oikosulkuvirrat ja avoimen piirin jännitteet STC-olosuhteissa laboratoriossa tehtyjen mittausten mukaan. Pinta-alaltaan $0,91 \text{ mm}^2$ kokoiselle kolmiliitosaurinkokennolle mitattiin laboratoriossa $0,111 \text{ mA}$ oikosulkuvirta ja $2,65 \text{ V}$ suuruinen avoimen piirin jännite STC-olosuhteissa valon intensiteetin ollessa 952 W/m^2 ja lämpötilan ollessa $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Mittauksen virta-jännite-käyrä on esitetty kuvassa 12. Kyseisen GaInP/GaAs/GaInNAsSb kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännite jakautuu liitosten kesken siten, että päällimmäisen liitoksen avoimen piirin jännite on noin $1,35 \text{ V}$, keskimmäisen liitoksen avoimen piirin jännite on noin $0,9 \text{ V}$ ja alimmaisen liitoksen avoimen piirin jännite on noin $0,4 \text{ V}$. [2][3][5][7][10][20, s. 47–49]



Kuva 12. Teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorilla AM1.5d/g optisella suodattimella mitatun kolmiliitosaurinkokennon IV-käyrä valon intensiteetillä 952 W/m^2 lämpötilassa $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aurinkosimulaattorin ominaisuuksista johtuen kuvan 12 IV -käyrän virrassa on näkyvissä pientä huojuntaa. Tästä ei kuitenkaan aiheudu suurta haittaa, sillä mittauksesta voidaan määrittää aurinkokennon oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite riittävällä tarkkuudella. Virran huojuntaa voidaan vähentää keskiarvoistamalla useita mittaustuloksia.

3.4.3 Resistiiviset häviöt

Kolmiliitosaurinkokennon sarjaresistanssille R_s määritettiin arvio sovittamalla simuloituja virta-jännite-käyriä aurinkosimulaattorilla mitattuihin kolmiliitosaurinkokennojen virta-jännite-käyriin 960 kW/m^2 valon intensiteetillä. Tuloksena $0,91 \text{ mm}^2$ kokoiselle kolmiliitosaurinkokennolle saatiin määritettyä $0,48 \Omega$ suuruinen sarjaresistanssi, kun kolmiliitosaurinkokennon pinnalla olevien kontaktisormien peittämä pinta-ala oli noin $5,6 \%$ koko kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta. Kontaktisormien peittämän pinta-alan ollessa noin $3,2 \%$ sarjaresistanssin arvoksi saatiin $0,90 \Omega$. Aurinkosimulaattorimittauksissa pimeän virran IV -käyristä on arvioitu yksiliitoksisen GaInNAs aurinkokennon rinnakkaisvastuksen resistiivisyydeksi $0,1\text{--}0,5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ [2]. Simulinkin aurinkokenno-komponentin viiden parametrin mallissa ei kuitenkaan tarvita rinnakkaisvastuksen resistanssin arvoa, sillä mallissa oletetaan sen olevan ääretön. [25]

Kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalliin asetettiin päällimmäisen ja keskimmäisen liitoksen, sekä keskimmäisen ja alimmaisen liitoksen väliin tunneliliitokset, joita mallinnettiin vastuksilla. Pieni osuus koko kolmiliitosaurinkokennon sarjaresistanssista aiheutuu tunneliliitoksista. Tunneliliitoksien resistiivisyys vaihtelee käytettyjen materiaalien ja niiden seostuskonsentraatioiden mukaan [32]. Esimerkiksi galliumarsenidista valmistetulle tunneliliitokselle on määritetty noin $0,19 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ resistiivisyys [3, s. 58]. Tutkimuksen kohteena olevan kolmiliitosaurinkokennon pinta-alan ollessa $0,0091 \text{ cm}^2$ kyseisen kolmiliitosaurinkokennon tunneliliitoksien resistanssiksi laskettiin $21 \text{ m}\Omega$. Matalilla konsentraatiokertoimilla tunneliliitoksia voidaan mallintaa ideaalisina häviöttöminä kontakteina, mutta konsentraatiokertoimen kasvaessa kasvavat myös tunneliliitoksien aiheuttamat häviöt. [5]

3.4.4 Energia-aukko

Kolmiliitosaurinkokennon liitoksien energia-aukot E_g saadaan erisuuruiseksi eri materiaaleilla. Liitoksille voidaan valmistaa haluttu koostumus esimerkiksi MBE-menetelmällä, jolloin koostumusta vastaavan energia-aukon suuruus voidaan laskea tai mitata. Kolmiliitosaurinkokennoissa päällimmäinen ja keskimmäinen liitos voidaan valmistaa esimerkiksi galliumindiumfosfidista (GaInP) ja galliumarsenidista (GaAs), koska näistä yhdisteistä valmistetuilla aurinkokennoilla on saavutettu korkea hyötysuhde ja liitoksien tuottama virta on saatu yhteensovitettua hyvin [7]. Tutkimuksen kohteena olevan kolmiliitosaurinkokennon päällimmäinen liitos koostui GaInP:sta, jonka energia-aukko oli $1,89 \text{ eV}$

ja keskimäinen liitos GaAs:sta, jonka energia-aukko oli 1,42 eV. Valmistusmenetelmästä riippuen alimmana olevan kolmannen galliumindiumnitridiarsenidiantimonidi (GaInNAsSb) liitoksen energia-aukko voi olla esimerkiksi 0,84–1,0 eV välillä. Kolmiliitosaurinkokennon alimmainen liitos voidaan valmistaa myös esimerkiksi germaniumista (Ge), mutta tällöin aurinkokennon hyötysuhde jää hieman alhaisemmaksi. GaInNAsSb liitoksen avulla aurinkokennon hyötysuhde voi olla 1,4 % suurempi. Tutkimuksen kohteena olevan kolmiliitosaurinkokennon alimmainen liitos koostui GaInNAsSb puolijohdteesta, jonka energia-aukko oli 1,0 eV. [1][3][5]

3.4.5 Lämpötilakertoimet

Aurinkokennon viiden parametrin malli Simulink-ympäristössä vaatii aurinkokennon tuottaman valovirran I_{ph} , sekä saturaatiovirran I_s lämpötilakertoimet. Lämpötilakertoimet voidaan asettaa myös nolnaan, mikäli aurinkokennoja tai aurinkopaneeleja simuloidaan pelkästään STC-olosuhteissa.

Valovirran I_{ph} lämpötilakerroin α_{ph} selvitettiin mittaamalla kolmiliitosaurinkokennoa eri lämpötiloissa. Mittauksissa oletettiin, että mitattu oikosulkuvirta I_{SC} on yhtä suuri kuin kolmiliitosaurinkokennon tuottama valovirta I_{ph} . Simulink-ympäristössä aurinkokenno-komponentin valovirran lämpötilariippuvuus perustuu kaavaan (4)

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_{STC})[1 + \alpha_{ph}(T - T_{STC})], \quad (4)$$

missä $I_{ph}(T)$ on aurinkokennon tuottama valovirta lämpötilassa T , $I_{ph}(T_{STC})$ on STC-olosuhteessa mitattu valovirta lämpötilassa T_{STC} ja α_{ph} on valovirran lämpötilakerroin. Kolmiliitosaurinkokennon tuottama virta mitattiin eri lämpötiloissa teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorilla, jolloin kaavasta (4) voitiin ratkaista valovirran lämpötilakerroin α_{ph} . Lämpötilakertoimen arvoksi saatiin 0,000881 1/°C. [25]

Saturaatiovirran lämpötilaeksponentin α_s vaikutuksesta yksidiodimallia noudattavan aurinkokennon saturaatiovirta I_{s1} muuttuu Simulinkin aurinkokenno-komponentissa lämpötilan muuttuessa. Yksidiodimallia noudattavalle aurinkokenno-komponentille saturaatiovirta kussakin lämpötilassa perustuu kaavaan (5)

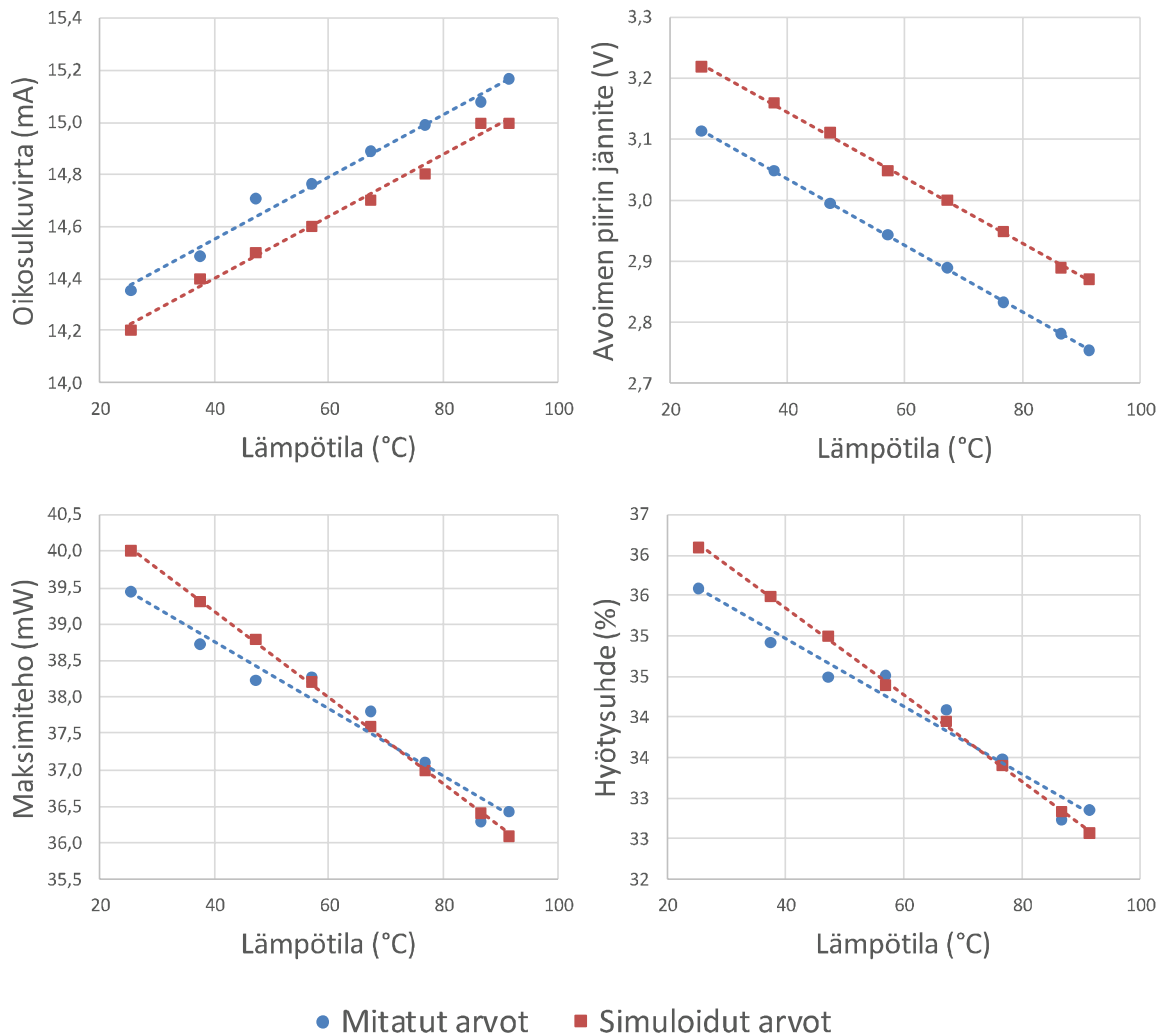
$$I_{s1}(T) = I_{s1} \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^{\left(\frac{\alpha_s}{N} \right)} e^{\left(E_g \left(\frac{T}{T_{STC}} - 1 \right) / \left(\frac{NkT}{q} \right) \right)}, \quad (5)$$

missä N on yksidiodimallia noudattavan aurinkokennon ideaalisuustekijä ja E_g energiaaukon suuruus [25]. Lämpötilan muuttuessa saturaatiovirran muutos aiheuttaa myös logaritmisien muutoksen avoimen piirin jännitteeseen V_{OC} kaavan (6) mukaisesti

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{o1}}{I_{o1}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_{o1}}, \quad (6)$$

missä $I_{SC} \gg I_{01}$ [14, s. 112]. Kuvassa 13 esitettyjen mittausten perusteella kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimeksi saatiin lasketua $-5,44 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ja simulaatioissa avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimeksi saatiin $-5,40 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ saturaatiovirran lämpötilakseenponentin α_s arvolla 6,2. Kuvassa 13 on esitetty vertailu mitatuista ja simuloituista kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirran, avoimen piirin jännitteen, maksimitehon ja hyötysuhteen arvoista lämpötilan funktiona.

Aurinkokennon viiden parametrin mallissa Simulink-ympäristössä aurinkokennolle voidaan asettaa myös sarjaresistanssin R_s lämpötilakerroin α_{R_s} , mutta sarjaresistanssin lämpötilariippuvien mittaustietojen puuttuessa tässä työssä suoritetuissa simulaatioissa ei ole huomioitu sarjaresistanssin lämpötilakerrointa. Simulaatioissa sarjaresistanssin lämpötilakertoimelle käytettiin arvoa nolla, joka oli Simulinkin aurinkokennon-komponentille asetettu oletusarvo.



Kuva 13. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, avoimen piirin jännite, maksimiteho ja hyötysuhde lämpötilan funktiona lämpötilavälillä $25\text{--}92 \text{ }^\circ\text{C}$ ja valon intensiteetillä $122 \text{ kW}/\text{m}^2$. Sinisellä värillä on esitettynä mitatut arvot ja punaisella värillä on esitettynä simuloituvat arvot.

Kuvasta 13 huomataan, että aurinkokennon oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen kulmakertoimet ovat samansuuruisia mitattujen arvojen ja simuloitujen arvojen kesken. Maksimitehon ja hyötysuhteen kulmakertoimetkin ovat likimain samansuuruisia mitattujen ja simuloitujen arvojen kesken. Sarjaresistanssin lämpötilariippuvuuden puuttuminen simulaatioista voi aiheuttaa pienen eron mitattujen ja simuloitujen arvojen välille. Simulaatiotulosten ja mittaustulosten tarkempi sovittaminen vaatisi lisäksi useampia mittauspisteitä ja useampien mittaustuloksien keskiarvoistamisen. Kuvassa 13 esitetyt mitatut arvot keskiarvoistettiin kolmen mittauksen kesken.

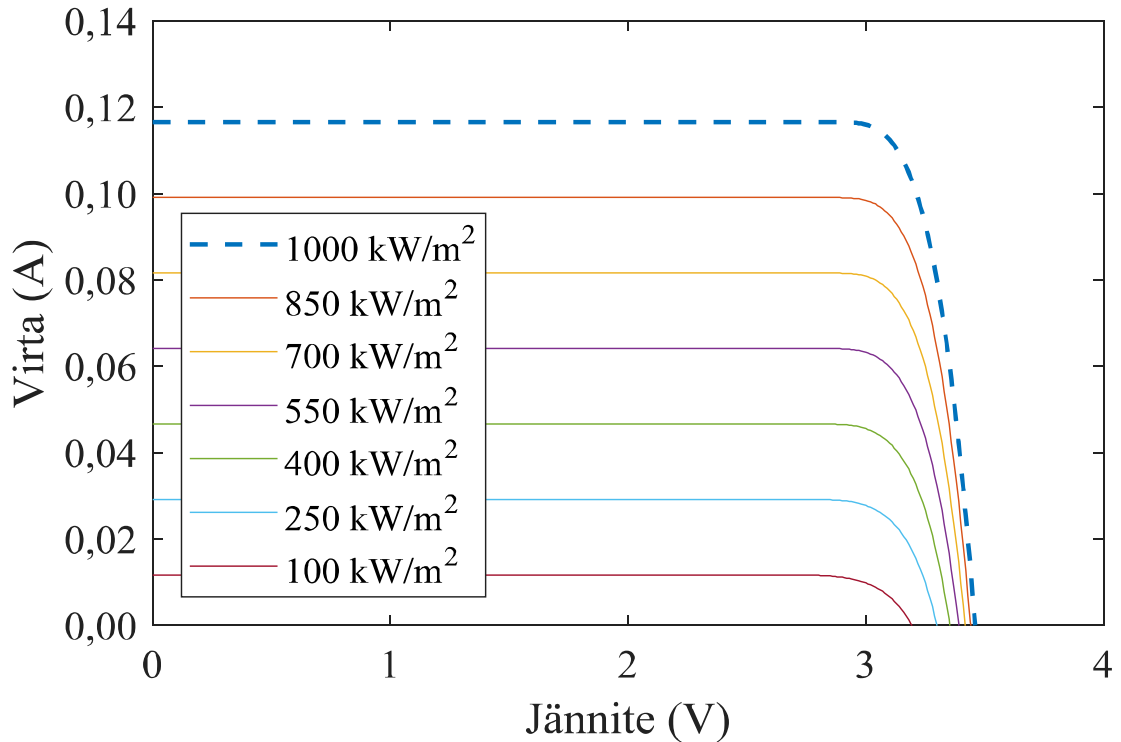
4. MATLAB/SIMULINK-SIMULAATIOT

Aurinkokennoja simuloimalla voidaan selvittää yksittäisten olosuhdemuutosten vaikutuksia aurinkokennon tuottamaan tehoon ja hyötysuhteeseen. Simulaatiomallin modulaa-risuus mahdollistaa myös useista aurinkokennoista muodostuvien aurinkopaneelien simu-laatiot. Aurinkopaneelien simulaatioiden *IV*- ja *PV*-käyrien eli virta-jännite- ja teho-jän-nite-käyrien avulla voidaan vertailla nopeasti eri olosuhteiden vaikutuksia aurinkopanee-lien sähköiseen käyttäytymiseen. Simulaatiot mahdollistavat aurinkopaneelien hyötysuh-teen kannalta optimaalisten olosuhteiden ja toimintojen tutkimisen. Simulaatioiden avulla voidaan myös tarkastella epäsuotuisien olosuhteiden vaikutuksia.

4.1 Valon intensiteetin vaikutus kolmiliitosaurinkokennon toi-mintaan

Valon intensiteetti eli Auringon säteilyn voimakkuus pinta-alayksikköä kohti on yksi suu-rimmista aurinkokennon tuottamaan tehoon vaikuttavista tekijöistä. Valon intensiteetin kasvaessa myös aurinkokennon virta, jännite sekä teho kasvavat. Maan pinnalle saapuvan Auringon säteilyn intensiteetti on suurimmillaan noin 1000 W/m^2 . CPV-aurinkokenno-sovelluksissa valon intensiteettiä nostetaan linsseillä tai peileillä siten, että linssille tai peilille saapuva auringonvalo keskitetään suuremmalta pinta-alalta pienemmälle pinta-alalle eli aurinkokennon pinnalle [14, s. 314]. Tällöin valon intensiteetti aurinkokennon pinnalla voi olla jopa 1000 kW/m^2 [16, s. 6].

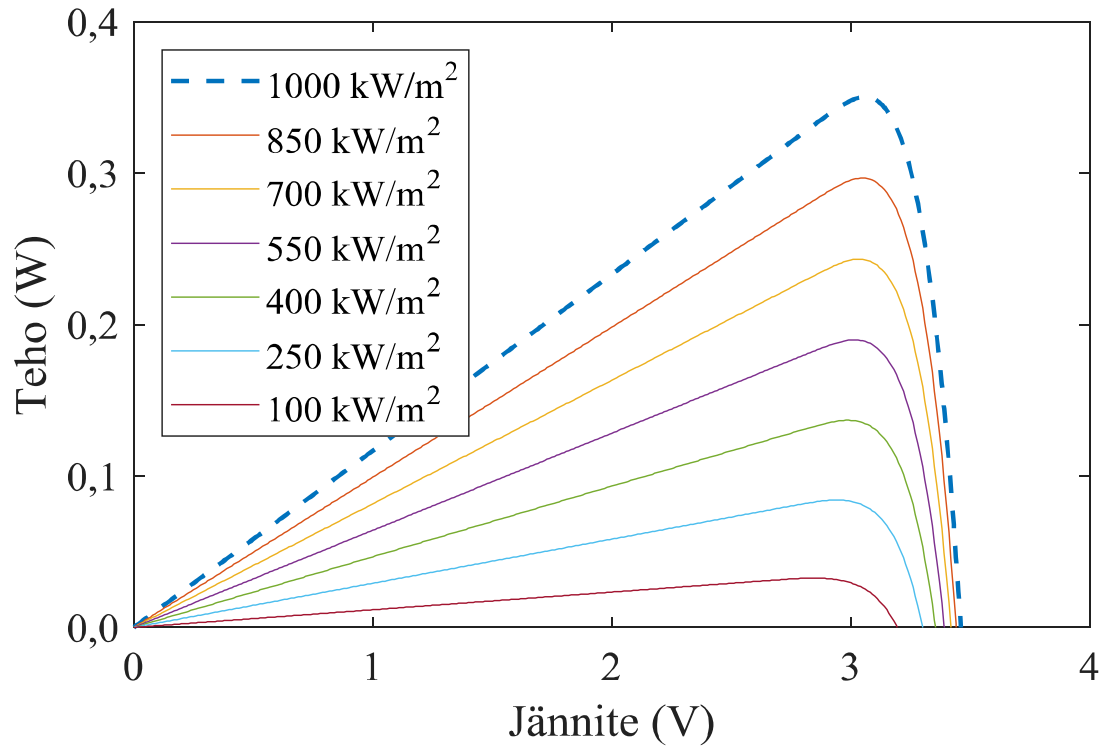
Diplomityössä toteutetun kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomallin avulla kolmiliito-saurinkokennon sähköistä toimintaa simuloitiin valon eri intensiteeteillä. Kuvassa 14 on esitetty valon intensiteetin vaikutus kolmiliitosaurinkokennon *IV*-käyrään. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*-käyrät simuloitiin 100 kW/m^2 , 250 kW/m^2 , 400 kW/m^2 , 550 kW/m^2 , 700 kW/m^2 , 850 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 valon in-tensiteeteillä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Simulaation avulla pyrittiin havainnollistamaan kysei-sen kolmiliitosaurinkokennon virtojen ja jännitteiden suuruuksia valon eri intensiteeteillä.



Kuva 14. Valon intensiteetin vaikutus yhden kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirtaan ja avoimen piirin jännitteeseen. IV -käyrät simuloitiin $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa $0,91\text{ mm}^2$ kokoisella kolmiliitoskennolla.

Valon intensiteetin kasvaessa 100 kW/m^2 :stä 1000 kW/m^2 :iin kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta kasvoi suoraan verrannollisesti noin $0,0117\text{ A}$:sta noin $0,117\text{ A}$:iin. Samalla kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännite kasvoi logaritmisesti $3,20\text{ V}$:sta $3,46\text{ V}$:iin. Kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännitteen kasvu johtui oikosulkuvirran I_{SC} kasvusta alaluvussa 3.4.5 esitetyn kaavan (6) mukaisesti. HCPV-sovelluksissa linssi voi keskittää suuren valon intensiteetin, kuten 1000 kW/m^2 , aurinkokennolle. Kuvassa 14 on korostettu sinisellä katkoviivalla kolmiliitosaurinkokennon IV -käyrä valon intensiteetillä 1000 kW/m^2 .

Kolmiliitosaurinkokennon tuottamaa tehoa jännitteen funktiona havainnollistettiin myös simulaation avulla. Kuvasta 15 nähdään valon intensiteetin vaikutus yhden $0,91\text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon PV -käyrään $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Kolmiliitosaurinkokennon PV -käyrät simuloitiin niin ikään valon intensiteeteillä 100 kW/m^2 , 250 kW/m^2 , 400 kW/m^2 , 550 kW/m^2 , 700 kW/m^2 , 850 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 . Taulukossa 1 on esitetty kuvissa 14 ja 15 esitettyjen simulaatioiden numeeriset tulokset. Kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirtojen, avoimen piirin jännitteiden ja maksimitehojen lisäksi taulukossa 1 on esitetty myös oikosulkuvirrantiheydet, täytekertoimet, sekä hyötysuhteet lämpötilassa $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ valon intensiteetin arvoilla 100 kW/m^2 , 250 kW/m^2 , 400 kW/m^2 , 550 kW/m^2 , 700 kW/m^2 , 850 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 .



Kuva 15. Valon intensiteetin vaikutus yhden kolmiliitosaurinkokennon tuottamaan tehoon ja jännitteeseen. PV-käyrät simuloitiin 25 °C lämpötilassa pinta-alaltaan 0,91 mm² kokoisella kolmiliitoskennolla.

Kuvasta 15 nähdään, että kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho kasvoi noin 33 mW:sta noin 350 mW:iin valon intensiteetin kasvaessa 100 kW/m²:stä 1000 kW/m²:iin. Kolmiliitosaurinkokennon teho lasketaan virran ja jännitteen tulona, jolloin teho kasvaa virran ja jännitteen kasvaessa. Kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhde nousi noin 2,7 % valon intensiteetin kasvaessa 100 kW/m²:stä 1000 kW/m²:iin.

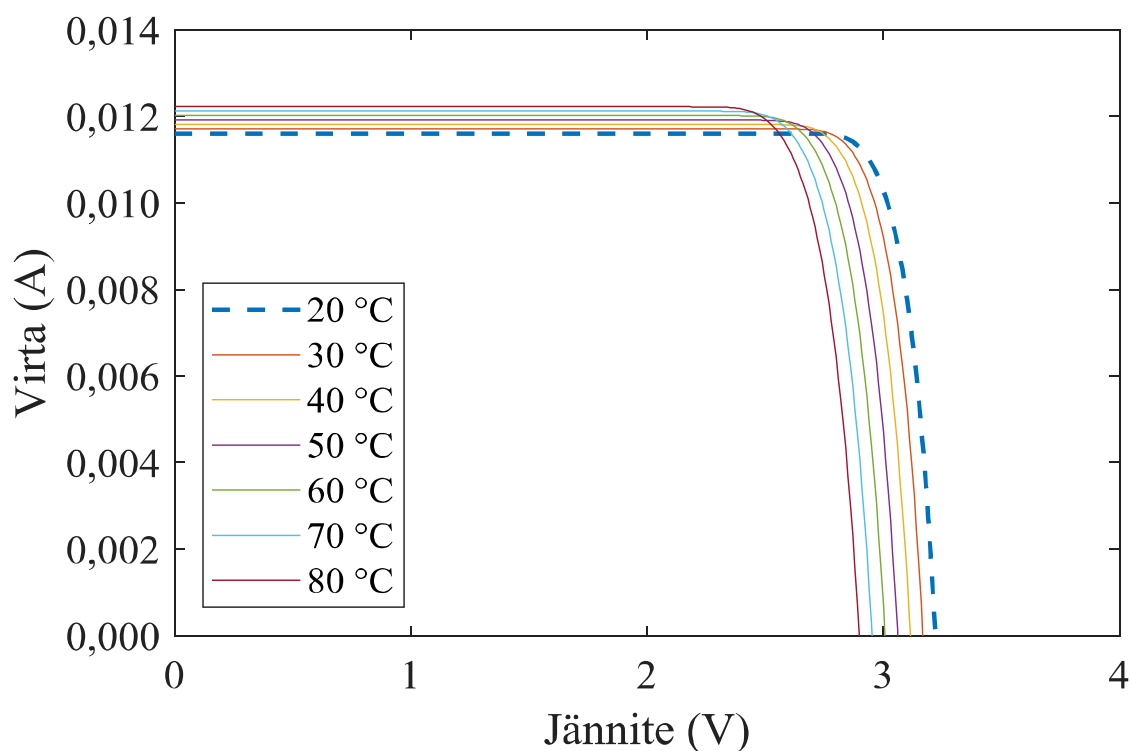
Taulukko 1. Yhden 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekertoimet, sekä hyötysuhteet erisuuruksilla valon intensiteeteillä 25 °C lämpötilassa.

G (kW/m²)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (A/cm²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
100	11,7	1,2813	3,20	0,0325	0,8721	35,76
250	29,1	3,2032	3,30	0,0841	0,8748	36,99
400	46,6	5,1251	3,36	0,1367	0,8726	37,56
550	64,1	7,0470	3,40	0,1898	0,8706	37,92
700	81,6	8,9689	3,42	0,2432	0,8711	38,17
850	99,1	10,8908	3,45	0,2966	0,8676	38,35
1000	116,6	12,8127	3,46	0,3502	0,8681	38,48

4.2 Lämpötilan vaikutus kolmiliitosaurinkokennon toimintaan

Tyypillisesti aurinkokennojen tuottama teho pienenee, kun lämpötila kasvaa. Lämpötilalla on suuri merkitys moniliitosaurinkokennojen toimintaan, vaikkakin vaikutus on pienempi kuin erilliskiteisillä tai monikiteisillä piiaurinkokennoilla [16, s. 7]. Moniliitosaurinkokennojen lämpötila voi olla 30–40 °C ympäristön lämpötilaa suurempi [20, s. 131]. CPV-aurinkokennoissa osa auringonvalon säteilyenergiasta muuttuu lämpöenergiaksi pienelle alueelle aurinkokennon pinnalle. Moniliitosaurinkokennossa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuus täytyy olla hyvä, jotta lämpöenergia saadaan johdettua mahdollisimman tehokkaasti pois aurinkokennolta. Käytettyjen materiaalien lämpölaajenemiskertoimien olisi myös syytä olla samaa suuruusluokkaa, jotta lämpölaajenemisesta johtuvat mekaaniset rasitukset saataisiin minimoitua. Lämpöenergia johdetaan usein moniliitosaurinkokennojen takana olevaan jäähdytyslevyyn. Jäähdytys toteutetaan tyypillisesti passiivisena jäähdytyksenä metallisen jäähdytyslevyn avulla. Joissakin tapauksissa lämpöenergia voidaan kerätä talteen kiertävään nesteeseen. Alumiinia käytetään pääsääntöisesti jäähdytyslevyissä, koska alumiinilla on hyvä lämmönjohtavuus ja alumiini on materiaalina kevyttä ja halpaa. [20, s. 125–134]

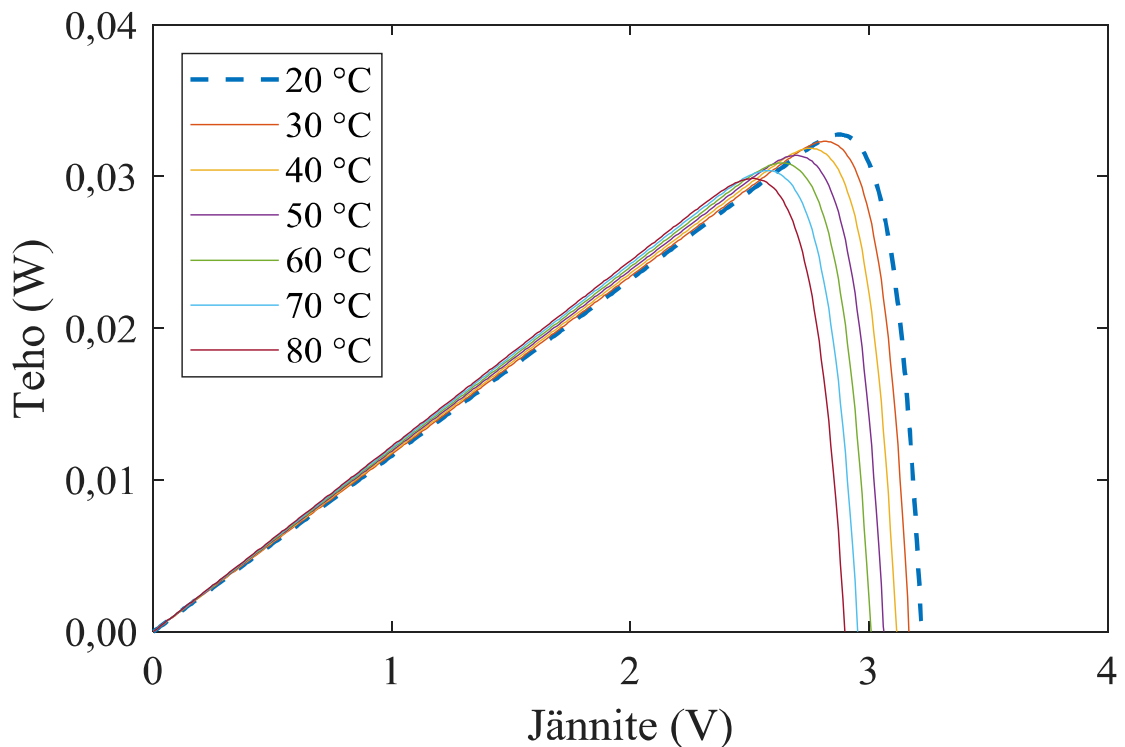
Lämpötilan muutoksien aiheuttamia vaikutuksia havainnollistettiin simuloimalla kolmiliitosaurinkokennon *IV*-käyriä eri lämpötiloissa. Kuvassa 16 on esitetty yhden 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*-käyrät lämpötiloissa 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C ja 80 °C. Kuvan 16 simulaatiossa valon intensiteetti oli 100 kW/m².



Kuva 16. Lämpötilan vaikutus yhden 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*-käyrään. *IV*-käyrät simuloitiin valon intensiteetillä 100 kW/m².

Kuvasta 16 nähdään, että lämpötilan kasvaessa kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta kasvoi hieman, mutta avoimen piirin jännite pieneni merkittävästi. Kuvassa 16 avoimen piirin jännite V_{OC} pieneni 3,22 V:sta 2,90 V:in lämpötilan noustessa 20 °C:sta 80 °C:een. Kuvan 16 simulaation avulla voitiin laskea myös kyseisen kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran lämpötilakertoimet. Avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimen arvoksi saatiin $-5,33 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Avoimen piirin jännite pieneni siis $5,33 \text{ mV}$ yhtä celsiusastetta kohti lämpötilan noustessa. Mittausten ja simulaatioiden kesken avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimet olivat hyvin lähellä toisiaan, sillä mittausten perusteella saman kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännitteen lämpötilakertoimeksi määritettiin $-5,44 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Simuloitujen tulosten mukaan kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirran lämpötilakerroin oli $10,0 \text{ }\mu\text{A}/^\circ\text{C}$, mikä vastasi myös hyvin mittausten perusteella laskettua oikosulkuvirran lämpötilakerrointa $11,9 \text{ }\mu\text{A}/^\circ\text{C}$.

Kolmiliitosaurinkokennon tuottamaa tehoa eri lämpötiloissa havainnollistettiin kuvassa 17 esitetyn simulaation avulla. Kuvassa 17 on esitettyä yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon PV -käyrät lämpötiloissa 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C ja 80 °C valon intensiteetillä $100 \text{ kW}/\text{m}^2$.



Kuva 17. Lämpötilan vaikutus yhden kolmiliitosaurinkokennon PV -käyrään. PV -käyrät simuloitiin $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisella kolmiliitosaurinkokennolla valon intensiteetillä $100 \text{ kW}/\text{m}^2$.

Kuvasta 17 huomataan, että kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho pieneni lämpötilan noustessa, koska kolmiliitosaurinkokennon teho lasketaan virran ja jännitteen tulona ja

kuvasta 16 havaittiin, että jännitteen pieneneminen oli merkittävämpää kuin virran kasvaminen lämpötilan noustessa. Avoimen piirin jännitteen suuri negatiivinen lämpötilariippuvuus vaikuttaa siis myös maksimitehon pienenemiseen. Kuvassa 17 esitetyssä simulaatiossa maksimiteho pieneni noin 33 mW:sta noin 30 mW:iin, kun lämpötila nousi 20 °C:sta 80 °C:een. Maksimitehon lämpötilakertoimeksi saatiin tällöin noin $-48 \mu\text{W}/^\circ\text{C}$. Kuvan 16 ja 17 simulaatioiden avulla kyseisen kolmiliitosaurinkokennon täytekertoimen FF lämpötilariippuvuudeksi saatiin $-5,7 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$, sillä täytekertoimen oli 20 °C:ssa lähes 0,88 ja 80 °C:ssa noin 0,84. Hyötysuhde puolestaan pieneni 36 %:sta noin 33 %:iin lämpötilan noustessa 20 °C:sta 80 °C:een. Tällöin hyötysuhteen lämpötilakerroin oli noin $-5,3 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$, eli hyötysuhde pieneni noin $-0,053 \%$ celsiusastetta kohti lämpötilan noustessa.

Taulukossa 2 on esitetty kuvien 16 ja 17 simulaation numeeriset tulokset. Taulukosta 2 nähdään oikosulkuvirtojen, oikosulkuvirrantiheyksien, avoimen piirin jännitteiden, maksimitehojen, täytekertoimien ja hyötysuhteiden muutokset lämpötilan muuttuessa 10 celsiusasteen välein 20 °C:sta 80 °C:een. Lisäksi taulukkoon 3 on koottu yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon simuloidut oikosulkuvirran, oikosulkuvirrantiheyden, avoimen piirin jännitteen, maksimitehon, täytekertoimen ja hyötysuhteen lämpötilakertoimet.

Taulukko 2. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekertoimet, sekä hyötysuhteet eri lämpötiloissa valon intensiteetillä $100 \text{ kW}/\text{m}^2$.

T (°C)	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
20	0,0116	1,2756	3,22	0,0328	0,8764	36,00
30	0,0117	1,2869	3,17	0,0323	0,8704	35,51
40	0,0118	1,2982	3,12	0,0319	0,8642	35,00
50	0,0119	1,3095	3,07	0,0314	0,8577	34,48
60	0,0120	1,3208	3,01	0,0309	0,8537	33,94
70	0,0121	1,3321	2,96	0,0304	0,8466	33,38
80	0,0122	1,3434	2,90	0,0299	0,8422	32,81

Taulukko 3. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon simuloidut oikosulkuvirran, oikosulkuvirrantiheyden, avoimen piirin jännitteen, maksimitehon, täytekertoimen ja hyötysuhteen lämpötilakertoimet valon intensiteetillä $100 \text{ kW}/\text{m}^2$ lämpötilavälillä 20–80 °C.

$\Delta I_{sc}/\Delta T$ ($\mu\text{A}/^\circ\text{C}$)	$\Delta J_{sc}/\Delta T$ ($\text{mA}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$)	$\Delta V_{oc}/\Delta T$ ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)	$\Delta P_{MP}/\Delta T$ ($\mu\text{W}/^\circ\text{C}$)	$\Delta FF/\Delta T$ ($1/^\circ\text{C}$)	$\Delta \eta/\Delta T$ ($1/^\circ\text{C}$)
10	1,13	-5,33	-48,3	$-5,7 \cdot 10^{-4}$	$-5,317 \cdot 10^{-4}$

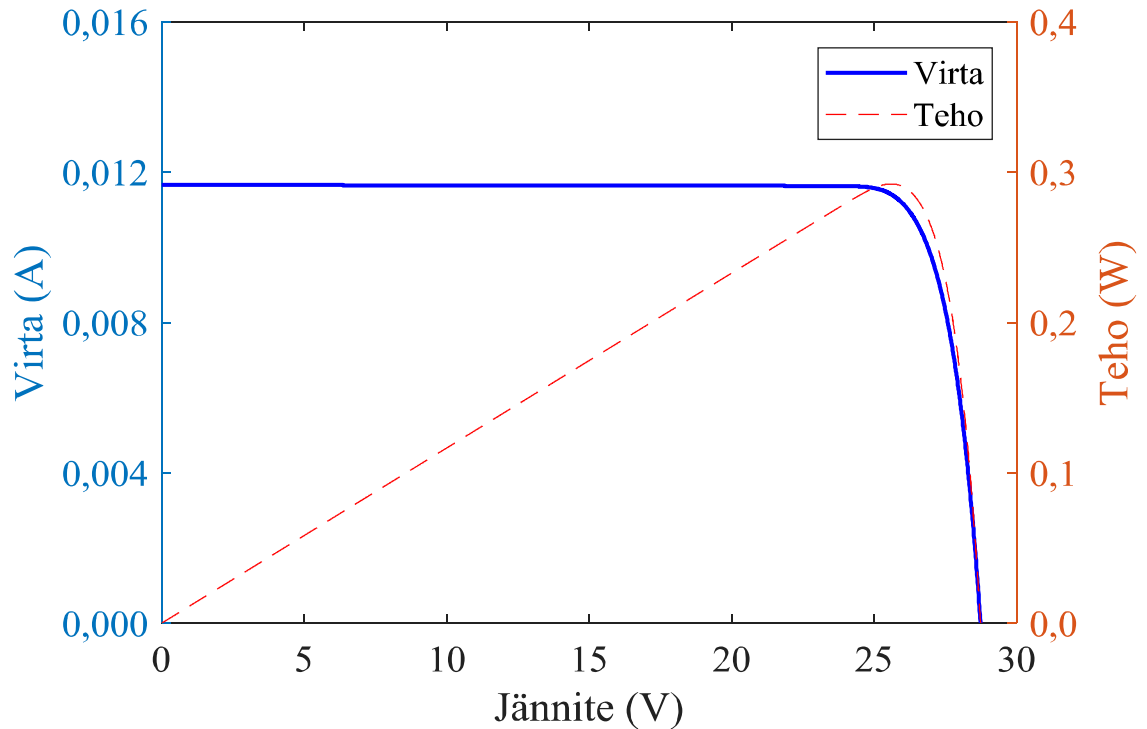
Edellä esitettyjen lämpötilasimulaatioiden tuloksista huomattiin, että kolmiliitosaurinkokennon absoluuttinen avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin $-5,33 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ oli paljon suurempi kuin yksiliitoksisen piiaurinkokennon tyypillinen lämpötilakerroin $-2,20 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ [8, s. 108]. Kolmiliitosaurinkokennossa liitoksia on kuitenkin kolme kappaletta, jolloin yhden liitoksen absoluuttiseksi lämpötilakertoimeksi jää vain noin $-1,80 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, mikäli oletetaan, että lämpötila muuttuu jokaisessa liitoksessa yhtä paljon. On myös huomioitava, että yhden HCPV-kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännite on parhaimmillaan noin $3,40 \text{ V}$ suuruusluokkaa, kun taas yhden erilliskide piiaurinkokennon avoimen piirin jännite voi parhaimmillaan olla suuruusluokkaa $0,73 \text{ V}$ lämpötilassa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja valon intensiteetillä $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ [11, s. 669]. Tällöin avoimen piirin jännitteen suhteellinen muutos on paljon suurempi yksiliitoksissa piiaurinkokennossa kuin kolmiliitoksissa kolmiliitosaurinkokennossa. Piiaurinkokennon lämpötilakerroin $-2,20 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ on noin $0,3 \%$ sen $0,73 \text{ V}$ suuruudesta avoimen piirin jännitteestä, kun taas kolmiliitosaurinkokennon lämpötilakerroin $-5,33 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ on vain noin $0,16 \%$ sen $3,40 \text{ V}$ suuruudesta avoimen piirin jännitteestä.

Oikosulkuvirran lämpötilakerroin oli kolmiliitosaurinkokennossa vain $10 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$, mikä on absoluuttisesti paljon pienempi kuin tyypillisen piiaurinkokennon lämpötilakerroin $2 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ [8, s. 108]. Toisaalta esimerkiksi 102 cm^2 kokoisen piiaurinkokennon oikosulkuvirta on noin $3,4 \text{ A}$ STC-olosuhteissa, kun taas tutkimuksen kohteena olleen $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta oli noin 111 mA STC-olosuhteissa. Tällöin kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirran lämpötilakerroin on noin $0,009 \%$ oikosulkuvirrasta ja piiaurinkokennon oikosulkuvirran lämpötilakerroin on noin $0,06 \%$ oikosulkuvirrasta. [12, s. 90]

4.3 CPV-aurinkopaneelien kytkentätopologiat

Auringon säteilystä tuotettua tehoa voidaan kasvattaa kytkemällä yksittäisiä aurinkokennoja aurinkopaneeliksi. Aurinkokennojen kytkentä sarjaan nostaa jännitettä ja rinnankytkentä virtaa. Tutkimuksen kohteena olleista kolmiliitosaurinkokennoista on jatkossa tarkoituksena valmistaa aurinkopaneeli. Aurinkopaneelien virtojen, jännitteiden ja tehojen suuruuksia havainnollistettiin tässä alaluvussa suoritetuissa simulaatioissa kytkemällä useita kolmiliitosaurinkokennoja sarjaan ja/tai rinnan. Erilaisista kytkentätopologioista koostuvien aurinkopaneelien virta-jännite- ja teho-jännite-käyriä vertailtiin. Simuloitujen aurinkopaneelien tärkeimmät tunnusluvut, kuten oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde, esitettiin myös taulukoituna *IV*- ja *PV*-käyrien yhteydessä. [14, s. 297]

Kuvassa 18 esitetyssä simulaatiossa tarkasteltiin miten aurinkokennojen kytkentä sarjaan vaikuttaa aurinkopaneelin virtaan, jännitteeseen ja tehoon. Kuvassa 18 on esitetty yhdeksän sarjaan kytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .



Kuva 18. Yhdeksän sarjaan kytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

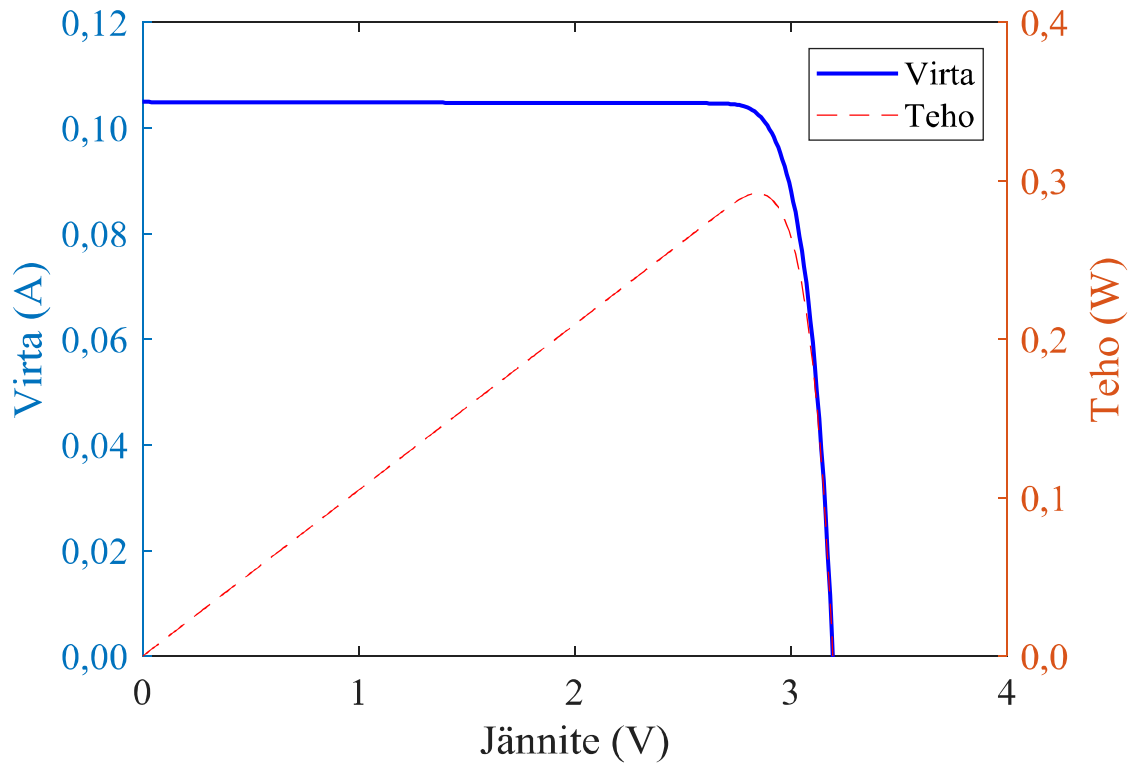
Kytettäessä yhdeksän kolmiliitosaurinkokennoa sarjaan, avoimen piirin jännite nousi, mutta oikosulkuvirta pysyi saman kuin yhdellä kolmiliitosaurinkokennolla. Yhdeksän sarjaan kytketyn kolmiliitosaurinkokennon avoimen piirin jännite oli noin $28,8 \text{ V}$, mutta oikosulkuvirta oli vain noin $11,7 \text{ mA}$. Taulukossa 4 on esitettyä oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen lisäksi myös yhdeksän sarjaan kytketyn kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrantiheys, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

Taulukko 4. Yhdeksän sarjaan kytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

$I_{sc} \text{ (A)}$	$J_{sc} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$P_{MP} \text{ (W)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
0,0117	1,2813	28,75	0,2921	0,8715	35,67

Aurinkokennoja voidaan kytkeä rinnakkain aurinkopaneelin virran kasvattamiseksi. Rinnankytkettyjen kolmiliitosaurinkokennojen virtojen, jännitteiden ja tehojen suuruuksia

havainnollistettiin kuvassa 19 esitetystä simulaatiosta. Kuvassa 19 on nähtävillä yhdeksän $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon on rinnankytkennän IV - ja PV -käyrä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .



Kuva 19. Yhdeksän rinnankytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

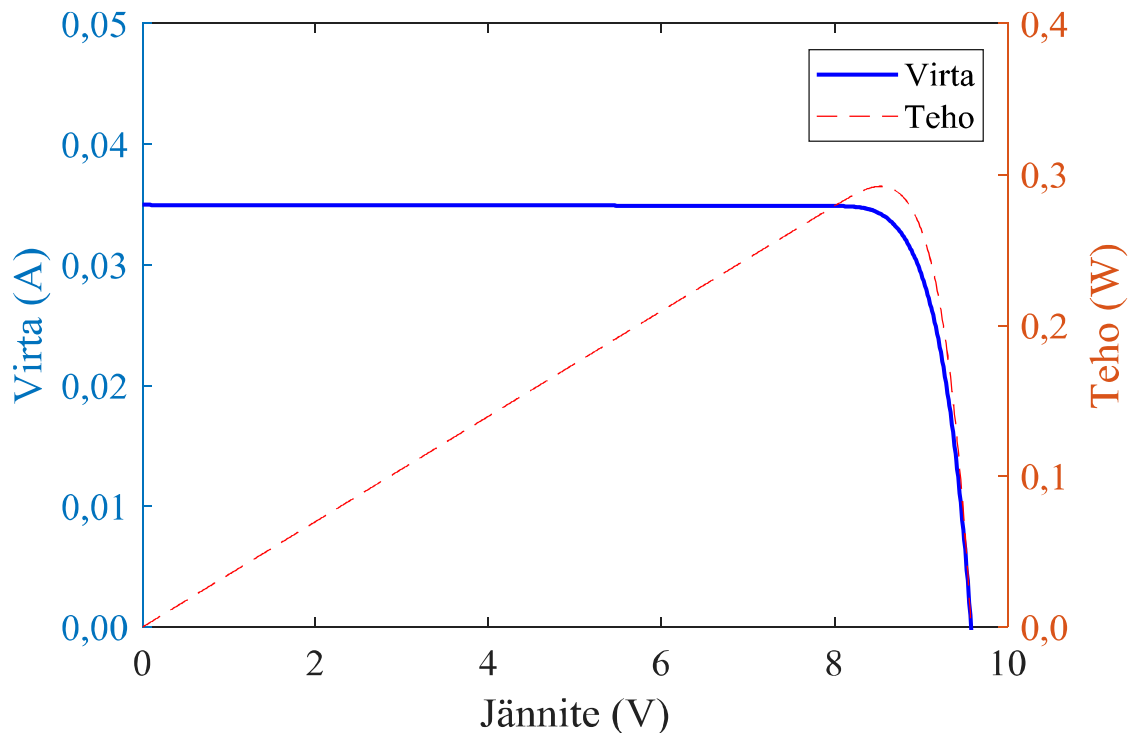
Yhdeksän rinnankytkettyä kolmiliitosaurinkokennoa kasvatti siis kytkentätopologian oikosulkuvirtaa, mutta ei avoimen piirin jännitettä. Yhdeksän rinnankytketyn kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta oli noin 105 mA , mutta avoimen piirin jännite vain noin $3,20 \text{ V}$. Taulukossa 5 on nähtävillä yhdeksän rinnankytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen lisäksi myös oikosulkuvirrantiheys, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

Taulukko 5. Yhdeksän rinnankytketyn $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

$I_{sc} \text{ (A)}$	$J_{sc} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$P_{MP} \text{ (W)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
0,1049	11,5314	3,20	0,2921	0,8699	35,67

HCPV-aurinkokennoja on hyödyllistä kytkeä sekä rinnan että sarjaan, jotta virta- sekä jännitetasoja saadaan nostettua aurinkopaneelissa. Kuvassa 20 on esitetty yhdeksästä kolmiliitosaurinkokennosta muodostuvan aurinkopaneelin virta- ja teho-käyrät jännitteen

funktiona 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m². Aurinkopaneeli koostui 3s3r kytkennästä, jossa oli kolme rinnankytkettyä kolmiliitosaurinkokennoja, jossa jokaisessa jonossa oli kolme sarjaan kytkettyä kolmiliitosaurinkokennoa. Kytkentätopologian simulaatiomalli esitettiin alaluvun 3.2 kuvassa 8.



Kuva 20. Yhdeksästä 0,91 mm² kokoisesta kolmiliitosaurinkokennosta koostuvan aurinkopaneelin IV- ja PV-käyrä 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m².

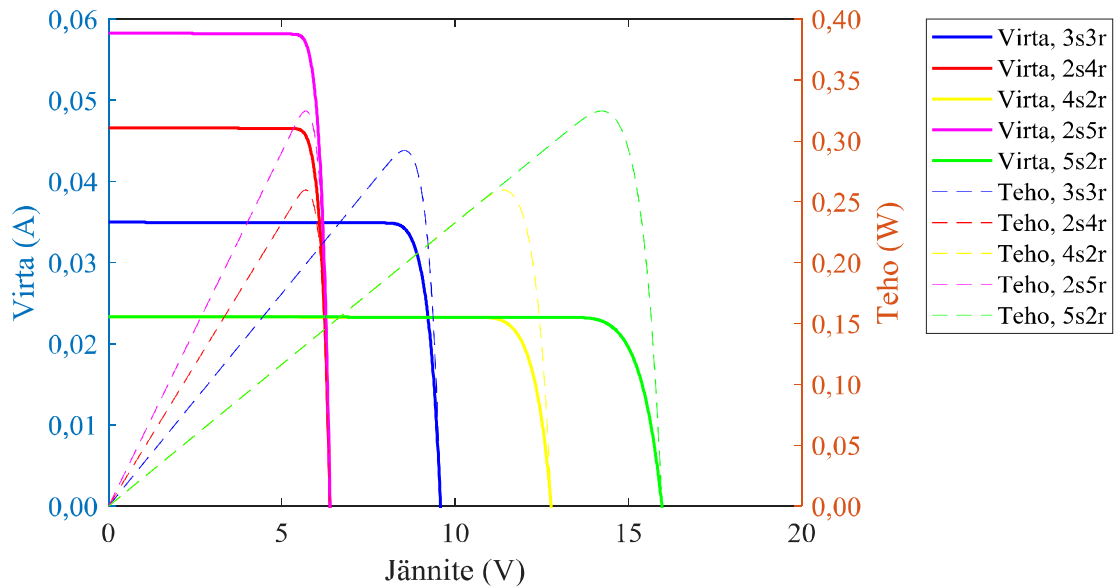
Sarjaan ja rinnankytkentöjen johdosta sekä aurinkopaneelin oikosulkuvirta että avoimen piirin jännite nousivat. Kuvassa 20 simuloitun aurinkopaneelin oikosulkuvirta oli 35,0 mA ja avoimen piirin jännite noin 9,60 V. Taulukossa 6 on esitetty oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen lisäksi kyseisen aurinkopaneelin oikosulkuvirrantiheys, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde.

Taulukko 6. Yhdeksästä 0,91 mm² kokoisesta kolmiliitosaurinkokennosta muodostuvan aurinkopaneelin oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m².

I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
0,0350	3,8438	9,59	0,2921	0,8709	35,67

Kuvassa 21 esitetyssä simulaatiossa vertailtiin erilaisten aurinkopaneelitopologioiden IV- ja PV-käyriä. Kuvan 21 simulaatiossa on kytketty 8, 9 tai 10 kolmiliitosaurinkokennoa

aurinkopaneeliksi viidellä eri tavalla. Kuvassa 21 kytkentätopologiat on erotettu toisistaan merkinnöillä, joissa ensimmäinen numero kertoo aurinkopaneelissa olevien sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen määrän ja toinen numero rinnankytkettyjen aurinkokennojen määrän. Optimaalisen toiminnan vuoksi jokaisessa rinnankytketyssä aurinkokennojenossa täytyi kuitenkin olla yhtä monta aurinkokennoa. Simulaation tärkeimmät tunnusluvut koottiin taulukkoon 7.



Kuva 21. Viiden erilaisen aurinkopaneelin IV- ja PV-käyrät 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m². Aurinkopaneeli koostui 0,91 mm² kokoisista kolmiliitosaurinkokennoista. Kuvatekstin ensimmäinen numero kertoo sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen määrän ja toinen numero rinnankytkettyjen aurinkokennojen määrän.

Taulukko 7. Kytkentätopologioiltaan erilaisten aurinkopaneelien oikosulkuvirratt, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekertoimet sekä hyötysuhteet. 0,91 mm² kokoisista kolmiliitosaurinkokennoista koostuvat aurinkopaneelit simuloitiin 25 °C lämpötilassa 100 kW/m² valon intensiteetillä. Kytkennän ensimmäinen numero kertoo sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen määrän ja toinen numero rinnankytkettyjen aurinkokennojen määrän.

Kytkenä	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
3s3r	0,0350	3,8438	9,59	0,2921	0,8709	35,67
2s4r	0,0466	5,1251	6,39	0,2597	0,8713	35,67
4s2r	0,0233	2,5625	12,78	0,2597	0,8713	35,67
2s5r	0,0583	6,4064	6,39	0,3246	0,8713	35,67
5s2r	0,0233	2,5625	15,97	0,3246	0,8716	35,67

Kuvasta 21 havaittiin, että mitä suurempi oli kolmiliitosaurinkokennojen lukumäärä aurinkopaneelissa, sitä suurempi oli aurinkopaneelin tuottama teho. Havaittiin myös, että

sama määrä aurinkokennoja voitiin kytkeä aurinkopaneeliksi eri tavoilla, jolloin maksimitehopisteen jännite ja virta muuttuivat. Kuvassa 21 simuloitujen tulokset auttavat valitsemaan kuhunkin tarpeeseen sopivimman kytkentätopologian CPV-aurinkopaneelille. Esimerkiksi aurinkopaneelin 5s2r kytkentätopologiaa voitaisiin harkita käytettäväksi sovelluksissa, joissa aurinkopaneelin täytyy tuottaa tehoa vähintään 12 V jännitteellä. Kuvassa 21 kyseisen aurinkopaneelin maksimitehopisteen jännite on noin 14,2 V.

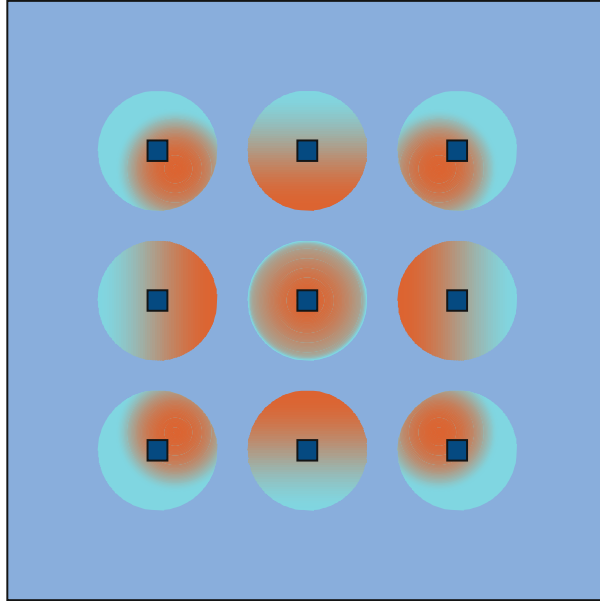
Kuvien 18, 19, 20 ja 21 simulaatiotuloksista nähtiin, miten kolmiliitosaurinkokennojen sarjaan kytkentä kasvatti aurinkopaneelin jännitettä ja rinnankytkentä virtaa. Maksimitehopisteen paikka muuttui jännitteen funktiona erilaisissa kytkentätopologioissa. Simuloituista tuloksista huomattiin kuitenkin, että maksimiteho ei muuttunut, jos aurinkokennojen määrä pysyi samana. Tämä johtuu siitä, että aurinkopaneelin teho lasketaan virran ja jännitteen tulona kytkentätopologiasta riippumatta. Tästä johtuen myös täyterroin ja hyötysuhde pysyivät samana kytkentätopologiasta riippumatta. Simulaatioissa aurinkokennojen oletettiin kuitenkin olevan täsmälleen samanlaisia samanlaisissa olosuhteissa. Todellisessa aurinkopaneelissa aurinkokennojen välillä voi olla yhteensopimattomuushäviöitä ja lämpötilaeroja, jotka voivat vaikuttaa muun muassa aurinkopaneelin hyötysuhteeseen. Simulaatioiden avulla voitaisiin jatkossa tarkastella myös eri kytkentätopologioiden välisiä eroja johdinvedoissa. Johdinvetojen pituus voi olla erisuuri erilaisilla kytkentätopologioilla, mikä saattaa aiheuttaa eroja aurinkopaneelin resistiivisissä häviöissä. Osassa kytkennöistä saatetaan selvittää lyhyemmällä johdinvedoilla.

Aurinkopaneelien Simulink-simulaatioissa aurinkokennojen sarjaan- ja rinnankytkennät vaativat paljon laskemista simulaattorin ratkaisijalta. Ideaalisesti mallinnetut komponentit, joissa esimerkiksi resistanssi voi olla nolla tai ääretön, aiheuttivat ajoittain virheilmoituksia simulaatio-ohjelman yrittäessä ratkaista simulaatiomallin kytkentöjä. Ongelmakohdat saatiin kuitenkin ratkaistua välttämällä resistiivisten vastuksien ääriarvoja. Aurinkokenno-komponenttien lukumäärän kasvattaminen simulaatiomallissa vaikutti kasvattamaan myös simulointiaikaa suoraan verrannollisesti. Tarkempia mittauksia simulointiajoista ei kuitenkaan tehty tässä diplomityössä.

4.4 CPV-aurinkopaneelin lämpötilajakauma

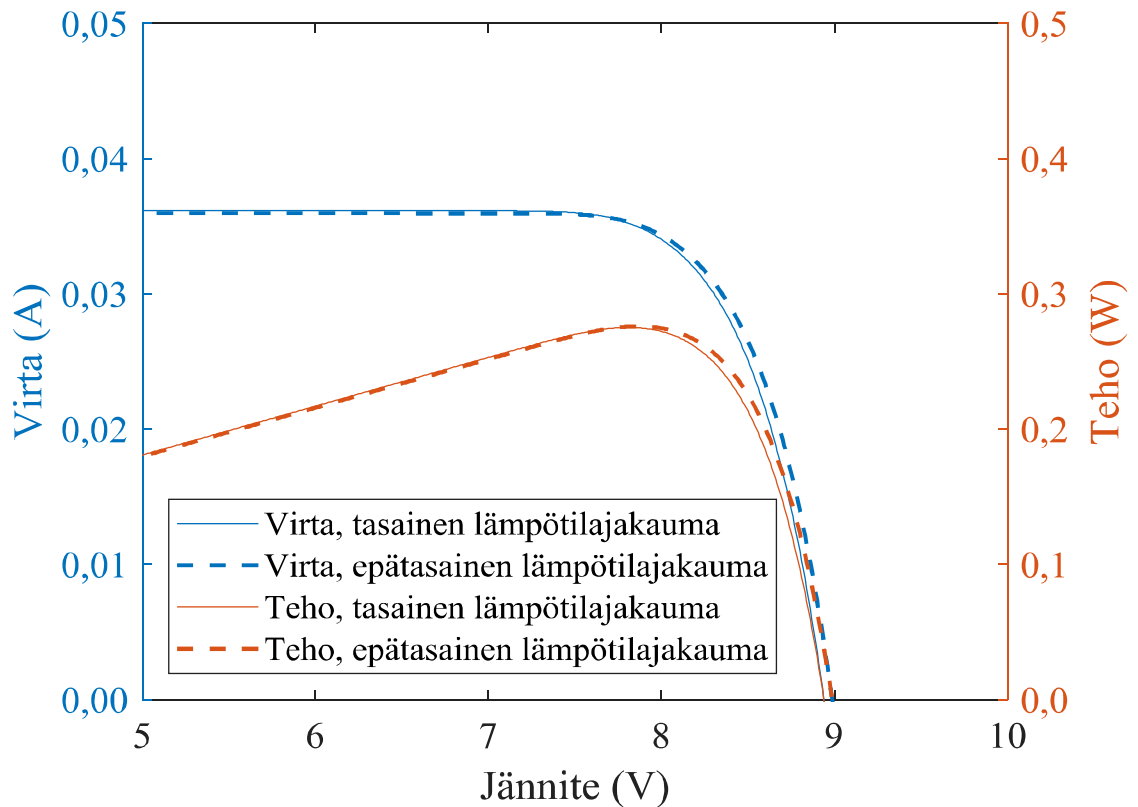
Kolmiliitosaurinkokennoista koostuvan aurinkopaneelin simulaatiomallin avulla voidaan simuloida aurinkopaneelin sähköistä toimintaa eri lämpötiloissa. Jokaiselle kolmiliitosaurinkokennolle voidaan asettaa simulaatiossa haluttu lämpötila. CPV-aurinkopaneelissa kaikki aurinkokennot eivät välttämättä ole aina samassa lämpötilassa [20, s. 123]. Kuva 22 havainnollistaa kärjistettyä tilannetta, jossa yhdeksästä aurinkokennosta koostuvassa aurinkopaneelissa lämpötila on jakautunut epätasaisesti aurinkokennojen kesken. Kuvan 22 aurinkopaneelissa keskellä olevan aurinkokennon lämpötila on muita aurinkokennoja suurempi, sillä sitä ympäröivät muut ympäristöä kuumemmat aurinkokennot, jotka voivat heikentää keskellä olevan aurinkokennon jäähtytystä. Sen sijaan nurkassa

olevien aurinkokennojen ympäristön lämpötila on matalampi, koska niiden läheisyydessä ei ole yhtä montaa aurinkokennoa lämmittämässä ympäristöä.



Kuva 22. Aurinkokennojen kärjistetty lämpötilajakauma 3s3r kytkentätopologiasta koostuvassa aurinkopaneelissa, jossa kolme aurinkokennoa on kytketty sarjaan ja kolme aurinkokennoa on kytketty rinnan.

Epätasaisen lämpötilajakauman vaikutusta aurinkopaneelin sähköiseen käyttäytymiseen tutkittiin yhdeksästä $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisesta kolmiliitosaurinkokennosta muodostuvassa aurinkopaneelissa. Aurinkopaneeli koostui alaluvussa 4.3 esitetystä 3s3r kytkentätopologiasta. Aurinkokennoille asetettiin lämpötilat kuvan 22 mukaan, siten että keskimmäisen aurinkokennon lämpötila oli $75 \text{ }^\circ\text{C}$, nurkissa olevien neljän aurinkokennon lämpötila oli $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ja muiden aurinkokennojen lämpötila oli $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Valon intensiteetti 100 kW/m^2 oli kaikille aurinkokennoille yhtä suuri. Kuvassa 23 on esitetty simulaation *IV*- ja *PV*-käyrä. Kuvaan 23 simuloitiin myös vertailutilanne, jossa kaikilla aurinkokennoilla oli yhtä suuri $65 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötila. Simuloitujen aurinkopaneelien oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde on esitetty taulukossa 8.



Kuva 23. Epätasaisen ja tasaisen lämpötilajakauman omaavien aurinkopaneelien IV- ja PV-käyrä 100 kW/m^2 valon intensiteetillä. Epätasaisella lämpötilajakaumalla aurinkopaneelissa aurinkokennojen lämpötilat olivat $55\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ ja tasaisella lämpötilajakaumalla aurinkopaneelin kaikkien aurinkokennojen lämpötilat olivat $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuvaajan jännite-akseli on leikattu välille 5–10 V.

Taulukko 8. Epätasaisen ja tasaisen lämpötilajakauman omaavien aurinkopaneelien oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekertoimet sekä hyötysuhteet. Aurinkopaneelit simuloitiin 100 kW/m^2 valon intensiteetillä ja ne koostuivat yhdeksästä $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisesta kolmiliitosaurinkokennosta.

Lämpötilajakauma	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
Tasainen	0,0362	3,9793	8,94	0,2751	0,8498	33,59
Epätasainen	0,0360	3,9608	8,99	0,2760	0,8517	33,70

Kuvan 23 IV- ja PV-käyristä ja taulukon 8 arvoista nähdään, että simuloitulla aurinkokennojen epätasaisella lämpötilajakaumalla ei ollut merkittävää vaikutusta aurinkopaneelin sähköiseen toimintaan verrattuna tasaiseen lämpötilajakaumaan. Epätasaisen lämpötilajakauman vaikutuksesta avoimen piirin jännite nousi hieman, sillä nurkissa olevilla aurinkokennoilla oli vertailutason aurinkokennoja matalampi lämpötila. Suurimman lämpötilan kokenut keskellä aurinkopaneelia ollut aurinkokenno ei pienentänyt aurinkopaneelin avoimen piirin jännitettä tasaisen lämpötilajakauman omaavan aurinkopaneelin

avoimen piirin jännitettä pienemmäksi, koska vertailutasoa kuumempia aurinkokennoja oli vain yksi, mutta vertailutasoa kylmempiä aurinkokennoja oli yhteensä neljä kappaletta. Näin ollen epätasaisen lämpötilajakauman omaavan aurinkopaneelin teho ja hyötysuhde olivat hieman suurempia, kuin tasaisen lämpötilajakauman omaavan aurinkopaneelin teho ja hyötysuhde.

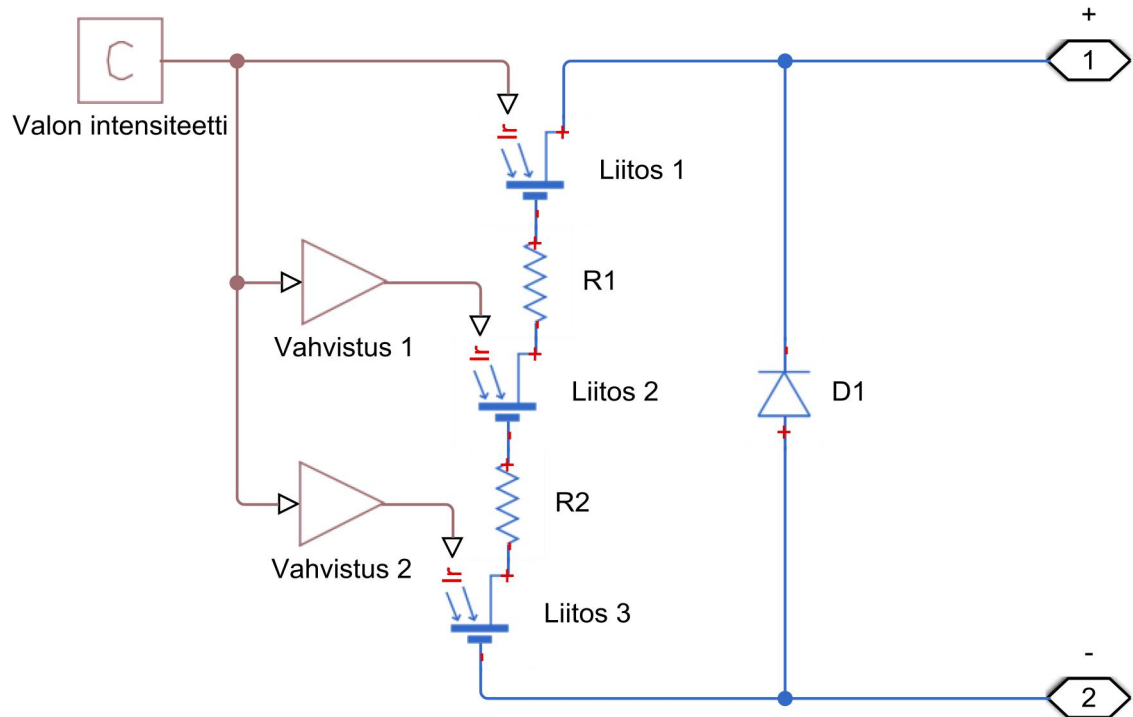
Simulaatiotuloksista havaittiin, että aurinkokennojen epätasaisen lämpötilajakauman vaikutukset aurinkopaneelissa jäivät odotettua pienemmiksi, sillä aurinkopaneelin maksimiteho ja hyötysuhde pysyivät lähes samoissa lukemissa tasaiseen lämpötilajakaumaan verrattuna. Maksimitehoissa oli eroa vain 0,9 mW ja hyötysuhteissa vain noin 0,1 %. Simulaatiotuloksista huomattiin kuitenkin, että aurinkokennojen lämpötilajakauma ei heikentänyt aurinkopaneelin suorituskykyä, vaan jopa nosti sitä hieman aurinkopaneelin reunoilla olevien aurinkokennojen jäähtyessä muita aurinkokennoja viileämmiksi.

Tarkastellussa aurinkopaneelissa oli vain yksi aurinkopaneelin keskellä oleva aurinkokenno ja 8 aurinkokennoa, jotka olivat aurinkopaneelin reunoilla. Lopputulos voisi olla toisenlainen suuremmassa aurinkopaneelissa, jossa keskellä olevien aurinkokennojen lukumäärä olisi suurempi kuin reunoilla olevien aurinkokennojen lukumäärä. Jatkossa tällaisia tilanteita voitaisiin simuloida enemmän.

4.5 CPV-aurinkopaneelin varjostuminen

Pilvet aiheuttavat tyypillisesti ohi meneviä varjostustilanteita ja usein koko aurinkopaneeli varjostuu pilvien varjojen vaikutuksesta. Aurinkopaneelien pinta voi kuitenkin likaantua esimerkiksi pölystä, puiden lehdistä tai lintujen jätöksistä pitemmäksikin aikaa, jollei paneelipintaa puhdisteta. Tällaiset varjostumiset vaikuttavat usein vain osaan aurinkopaneelin aurinkokennoista. Varjostunut aurinkokenno muuttuu aurinkopaneelissa kuormaksi, mikä pienentää koko aurinkopaneelin tuottamaa tehoa. Pahimmassa tapauksessa muut aurinkokennot syöttävät virtaa varjostuneen aurinkokennon kautta, jolloin se kuumenee, mikä voi johtaa koko aurinkopaneelin rikkoutumiseen. [14, s. 863–865]

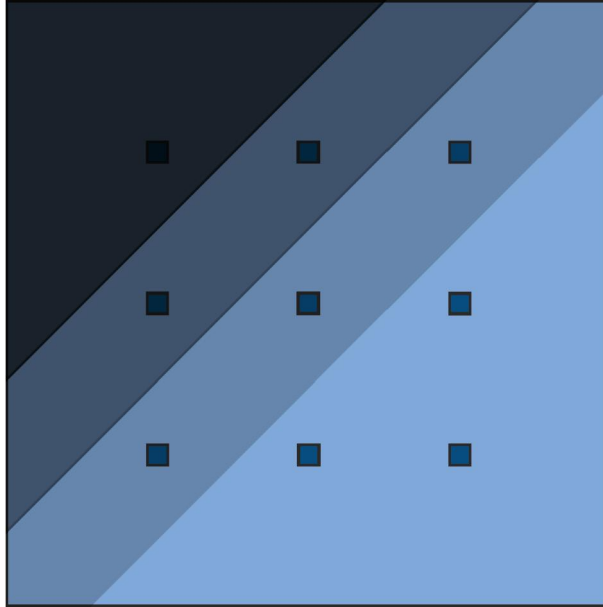
Varjostuneet aurinkokennot voidaan ohittaa ohitusdiodien avulla. Tyypillinen piiaurinkopaneeli koostuu 36:sta sarjaan kytketystä aurinkokennosta ja kolmesta ohitusdiodista. Tällöin yhden ohitusdiodin kautta ohitetaan 12 aurinkokennoa. Toimiessaan ohitusdiodit aiheuttavat sarjaan kytkennässä jännitteenaleneman, sillä ohitusdiodien kynnysjännite on tyypillisesti 0,6 V suuruusluokkaa. Varjostustilanteessa voidaan menettää myös ohitusdiodien ohittamien aurinkokennojen tuottama teho. [14, s. 296, 303]



Kuva 24. Yhden kolmiliitosaurinkokenno simulaatiomalli, jossa kolmiliitosaurinkokennon rinnalle on asetettu ohitusdiodi D1. Varjostustilanteessa ohitusdiodi ohittaa kolmiliitosaurinkokennon kaikki liittokset.

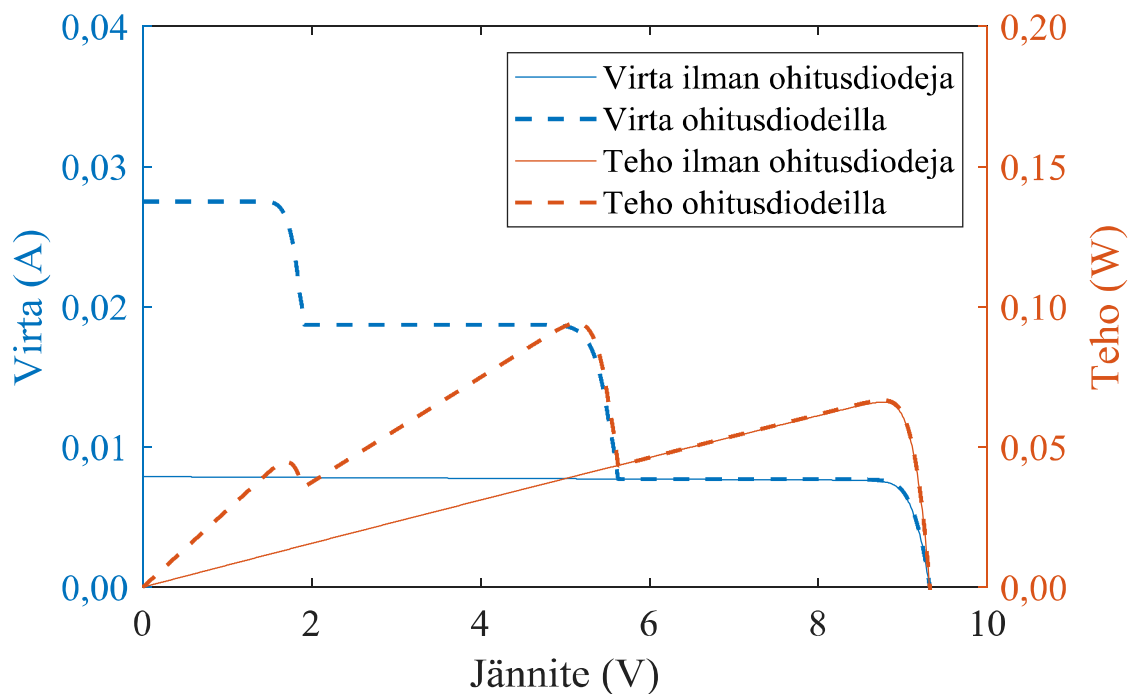
Ohitusdiodien käyttöä CPV-aurinkopaneelissa tutkittiin simulaatiomallin avulla. Simuloitavalle CPV-aurinkopaneelille asetettiin simulaatiomallissa ohitusdiodit jokaisen kolmiliitosaurinkokennon rinnalle kuvan 24 mukaisesti. CPV-aurinkopaneeli koostui yhdeksästä kolmiliitosaurinkokennosta kuten alaluvun 3.2 kuvassa 8 esitettiin. Valon intensiteetti voitiin asettaa simulaatiomallissa erikseen jokaiselle kolmiliitosaurinkokennolle, mikä mahdollisti osittaisten varjostustilanteiden simulaatiot. Simulaatiomallissa käytettiin ohitusdiodia, jonka kynnysjännite oli 0,6 V, resistanssi 0,3 Ω ja estoajännitteistetty konduktanssi $1 \cdot 10^{-8} \text{ 1}/\Omega$.

Simulaatiomallin avulla simuloitiin osittainen varjostustilanne, jossa kuusi yhdeksästä kolmiliitosaurinkokennosta oli varjostunut kuvan 25 osoittamalla tavalla. Valon intensiteetit kuudelle varjostuneelle kolmiliitosaurinkokennolle olivat $0 \text{ W}/\text{m}^2$, $20 \text{ kW}/\text{m}^2$, $20 \text{ kW}/\text{m}^2$, $50 \text{ kW}/\text{m}^2$, $50 \text{ kW}/\text{m}^2$, $50 \text{ kW}/\text{m}^2$. Valon intensiteetti oli $100 \text{ kW}/\text{m}^2$ kolmelle kolmiliitosaurinkokennolle, jotka eivät olleet varjostuneet. Kuvassa 25 oleva aurinkopaneeli koostui alaluvussa 4.3 esitetystä 3s3r kytkentätopologiasta.



Kuva 25. Esimerkkutilanne, jossa aurinkopaneelin yhdeksästä aurinkokennosta kuusi aurinkokennoa oli varjostunut. Aurinkopaneelissa oli 3s3r kytkentä, jossa kolme aurinkokennoa oli kytketty sarjaan ja kolme aurinkokennoja oli kytketty rinnan.

Simulaatiot suoritettiin 25 °C lämpötilassa. Kuvasta 26 nähdään varjostuneen aurinkopaneelin simuloitunut *IV*- ja *PV*-käyrät. Taulukossa 9 on esitetty simuloitujen aurinkopaneelien oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täytekero ja hyötysuhde.



Kuva 26. Varjostuneen aurinkopaneelin *IV*- ja *PV*-käyrät 25 °C lämpötilassa. Kuvassa on esitetty katkoviivalla aurinkopaneeli, jossa oli ohitusdiodit ja yhtenäisellä viivalla aurinkopaneeli, jossa ei käytetty ohitusdiodeja. Valon intensiteetti oli välillä 0–100 kW/m².

Taulukko 9. Ohitusdiodeilla ja ilman ohitusdiodeja olevien aurinkopaneelien oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin sekä hyötysuhde osittaisessa varjostustilanteessa 25 °C lämpötilassa. Varjostustilanteessa valon intensiteetti oli välillä 0–100 kW/m².

Ohitusdiodit	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
Ei	0,0079	0,8671	9,320	0,0660	0,8976	14,80
Kyllä	0,0275	3,0238	9,322	0,0942	0,3672	21,13

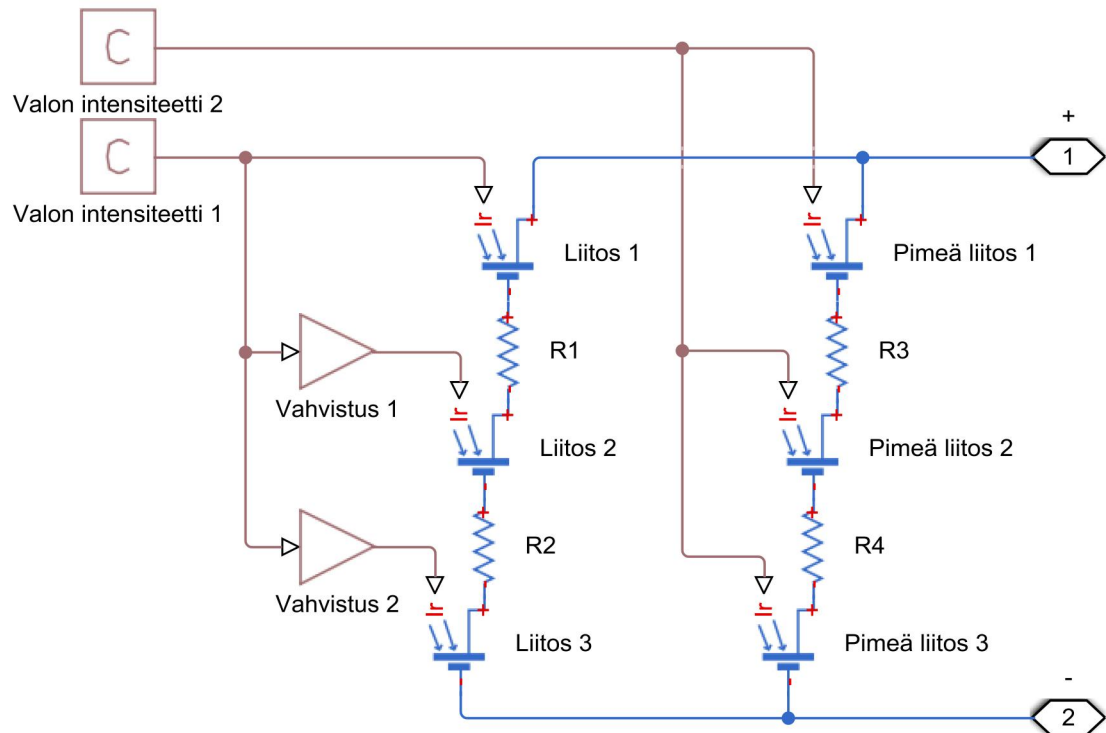
Taulukon 9 arvoja tarkastelemalla huomataan, että osittaisessa varjostustilanteessa aurinkopaneelista saatiin ohitusdiodeja käyttämällä noin 28 mW suurempi teho ja hyötysuhde nousi noin 6,3 %. Yhdessä aurinkopaneelin rinnankytketyistä aurinkokennojenonoista yksikään ohitusdiodi ei ollut toiminnassa, jolloin se pakotti aurinkopaneelin avoimen piirin jännitteen noin 9,3 V:iin. Osittaisessa varjostustilanteessa muut rinnankytketyt aurinkokennojonot voivat kuitenkin tuottaa erisuuren virran. Toimiessaan ohitusdiodit aiheuttivat olkapäämuodostelman *IV*-käyrään, sillä varjostuneiden aurinkokennojen tuottama virta oli pienempi kuin kirkkaammassa valossa olleiden aurinkokennojen tuottama virta.

Kuvasta 26 nähdään, että aurinkopaneelilla oli kolme eri tehopistettä, joista yksi oli suurempi kuin muut. Useiden eri tehopisteiden vuoksi aurinkopaneelin yhteydessä olisi hyödyllistä käyttää myös maksimitehopisteen seuraajaa (MPPT), joka pyrkii pitämään aurinkopaneelin toimintapisteen maksimitehopisteessään. Aurinkopaneelin simulaatiomalliin voidaan jatkossa lisätä MPPT-algoritmi, jonka avulla aurinkopaneelin toimintapistettä seurataan varjostustilanteissa siten, että aurinkopaneeli tuottaa kulloinkin saatavissa olevan maksimitehon. MPPT-tekniikoita on useita, joista esimerkiksi perturbaatio ja tarkkailu –algoritmi (P&O) voisi olla varteenotettava vaihtoehto CPV-aurinkopaneelin simulaatioissa. P&O-algoritmi on hyvin yleisesti käytetty MPPT-tekniikka yksinkertaisen toimintansa ja helpon toteutuksensa vuoksi. [20, s. 226–229]

4.6 Kolmiliitosaurinkokennon kontaktisormet

Auringon säteilystä tuotettu virta johdetaan pois aurinkokennolta, minkä vuoksi aurinkokennon pinnalle valmistetaan usein sormimuodostelman muotoon metallikontaktit. Moniliitosaurinkokennon päällä sormimuodostelmassa olevat metallikontaktit kuitenkin varjostavat aurinkokennosta kontaktisormien alle jääviä alueita. Valon intensiteetti on kontaktisormien alle jäävillä alueilla pienempi kuin muualla aurinkokennossa.

Diplomityössä pyrittiin mallintamaan metallisia kontaktisormia kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomallissa mahdollisimman tarkasti. Kuvassa 27 on yhden kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalli, jossa liitosten 1–3 rinnalle on asetettu pimeät liitokset 1–3, jotka mallintavat kolmiliitosaurinkokennossa kontaktisormien alle jääviä alueita. Kolmiliitosaurinkokenno koostui siis ikään kuin virtaa tuottavista liitoksista ja liitoksista, jotka eivät tuota virtaa.

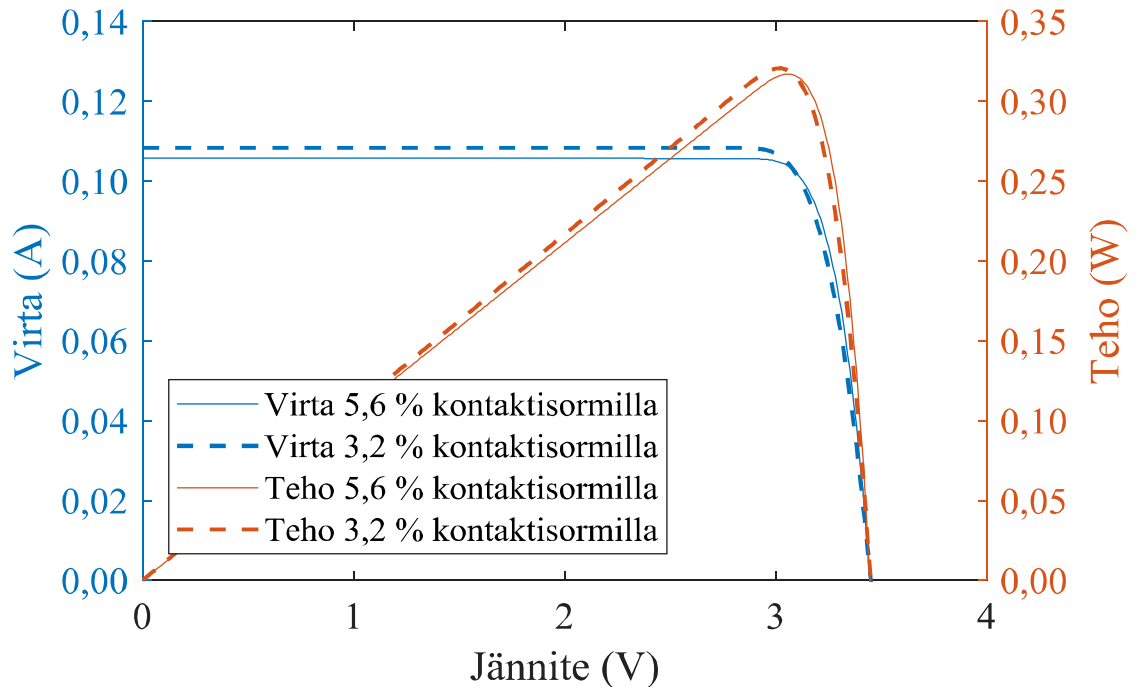


Kuva 27. Yhden kolmiliitosaurinkokenno simulaatiomalli, jossa kolmiliitosaurinkokennon liitoksien 1–3 rinnalle on asetettu kontaktisormia mallintavat pimeät liitokset 1–3, sekä niiden välissä olevat tunneliliitokset R3 ja R4.

Kuvan 27 simulaatiomallissa oletettiin, että kontaktisormien alle jäävät alueet eivät saa yhtään auringonvaloa, jolloin valon intensiteetti niille oli 0 W/m^2 . Pimeille liitoksille voidaan asettaa myös nollassa poikkeava valon intensiteetti, mikäli halutaan simuloida tilannetta, jossa valo siroaa kontaktisormien alle. Simulaatiomallissa kontaktisormien alle jäävien alueiden pinta-alojen muutokset otettiin huomioon oikosulkuvirran muutoksina, siten että kontaktisormien pinta-alan kasvaessa liitoksien 1–3 oikosulkuvirta pieneni ja pimeiden liitoksien 1–3 oikosulkuvirta suureni. Kolmiliitosaurinkokennon liitoksien 1–3 ja pimeiden liitoksien 1–3 yhteen laskettu oikosulkuvirta pysyi kuitenkin samansuuruisena. Alaluvussa 3.4.2 esitettyjen mittauksien mukaan tutkimuksen kohteena olleen $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta oli noin $0,111 \text{ mA}$ lämpötilassa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

Simulaatiomallissa huomioitiin myös kolmiliitosaurinkokennon sarjaresistanssin muutokset kontaktisormien pinta-alan muuttuessa. Alaluvussa 3.4.3 esitettyjen mittauksien mukaan yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon sarjaresistanssi oli $0,48 \text{ } \Omega$ kontaktisormien pinta-alan ollessa $5,6 \text{ } \%$ kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta ja $0,90 \text{ } \Omega$ kontaktisormien pinta-alan ollessa $3,2 \text{ } \%$ kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta.

Kuvan 27 simulaatiomalli simuloitiin 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 960 kW/m². Kuvasta 28 nähdään yhden kolmiliitosaurinkokennon *IV*- ja *PV*-käyrät, kun kontaktisormien pinta-alat olivat 5,6 % ja 3,2 % koko kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta. Simulaation numeeriset tulokset ovat esitettyinä taulukossa 10.



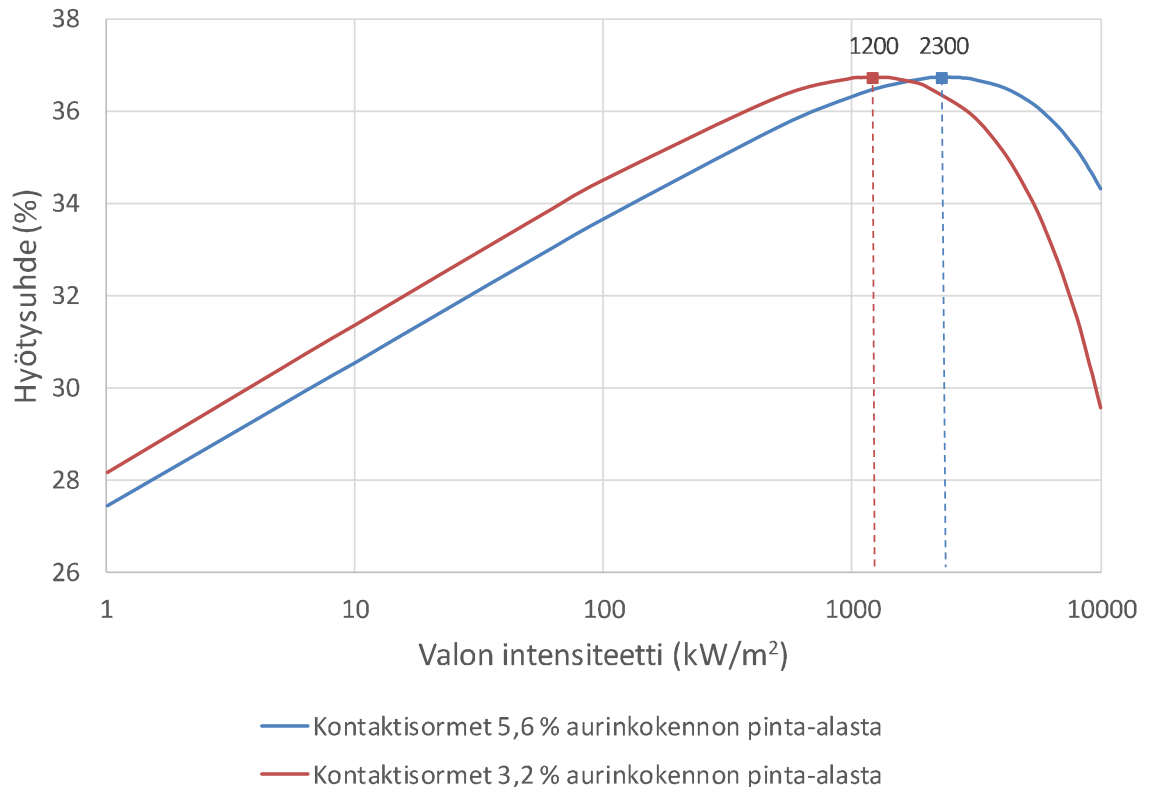
Kuva 28. Metallisten kontaktisormien vaikutus 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*- ja *PV*-käyriin 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 960 kW/m², kun kontaktisormien peittämä pinta-ala oli 5,6 % ja 3,2 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta.

Taulukko 10. 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, oikosulkuvirtatiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täytekertoimen ja hyötysuhde 25 °C lämpötilassa valon intensiteetillä 960 kW/m², kun kontaktisormien peittämä pinta-ala oli 5,6 % ja 3,2 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta.

Kontaktisormien osuus aurinkokennon pinta-alasta (%)	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
5,6	0,1057	11,6114	3,45	0,3170	0,8697	36,29
3,2	0,1083	11,9066	3,45	0,3206	0,8578	36,70

Kuvan 28 ja taulukon 10 simulaatiotulosten perusteella nähdään, että pinta-alaltaan pienemmällä kontaktisormilla aurinkokennon tuottama teho ja hyötysuhde ovat suuremmat. Kontaktisormien pinta-ala ei kuitenkaan voi pienentyä rajattomasti, sillä tällöin aurinkokennon sarjaresistanssi kasvaa ja virranjohtavuus heikkenee. Sarjaresistanssin kasvu näkyy esimerkiksi täytekertoimen pienentymisenä. Taulukon 10 arvoista nähdään, että täytekertoimen pienentyi noin 0,87:stä noin 0,86:een kontaktisormien pinta-alan pienentyessä 5,6 %:sta 3,2 %:iin aurinkokennon pinta-alasta.

Simuloimalla eri suuruisien kontaktisormien omaavien kolmiliitosaurinkokennojen simulaatiomalleja eri valon intensiteeteillä voitiin ennustaa millä valon intensiteetillä saavutetaan kunkin aurinkokennon maksimihyötysuhde. Kuvassa 29 on esitetty kahden kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhde valon intensiteetin funktiona kontaktisormien pinta-alan ollessa 5,6 % ja 3,2 % aurinkokennojen pinta-alasta. Kuvasta 29 nähdään, että kontaktisormien pinta-alan kasvaessa aurinkokennon hyötysuhdemaksimi siirtyy suuremmille valon intensiteeteille.



Kuva 29. $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhde valon intensiteetin funktiona $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa kontaktisormien pinta-alan ollessa 5,6 % ja 3,2 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta. Kuvassa x-akseli (valon intensiteetti) on esitetty logaritmisena.

Simulaation mukaan kolmiliitosaurinkokennolla, jossa kontaktisormien peittopinta-ala on 3,2 %, maksimihyötysuhde 36,74 % saavutetaan 1200 kW/m^2 valon intensiteetillä. 5,6 % kontaktisormien peittopinta-alan omaavan kolmiliitosaurinkokennon maksimihyötysuhde 36,74 % saavutetaan vasta korkeammalla 2300 kW/m^2 valon intensiteetillä. Maksimihyötysuhteen saavuttamisen jälkeen hyötysuhde pienenee jyrkästi valon intensiteetin kasvaessa, koska aurinkokennon tuottama virta kasvaa valon intensiteetin kasvaessa, jolloin aurinkokennon sarjaresistanssista johtuvat tehohäviöt kasvavat. [20, s. 20]

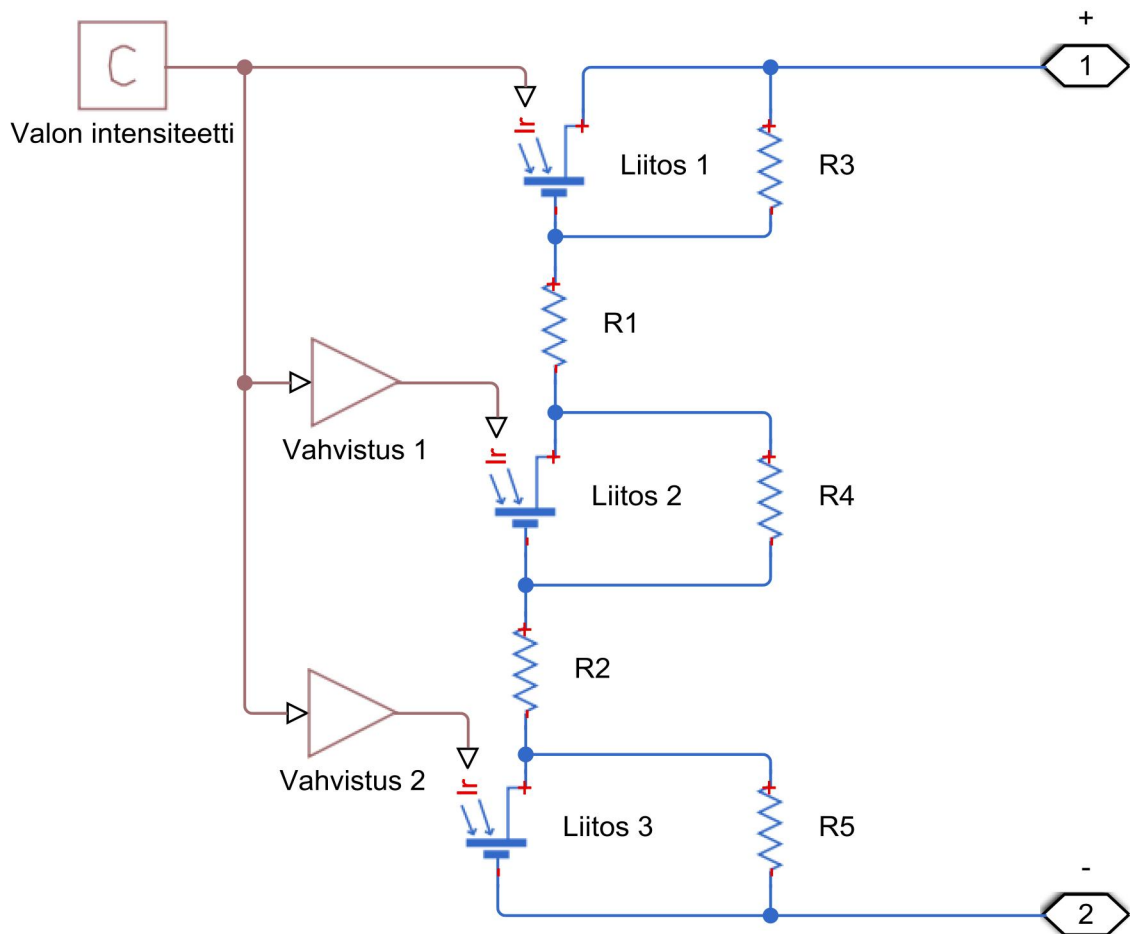
Aurinkokennon pinnalla sormimuodostelmassa olevien metallikontaktien, eli kontaktisormien, pinta-ala vaikutti oleellisesti aurinkokennon sähköiseen suorituskykyyn. Kontaktisormet varjostavat aurinkokennoa, mutta aurinkokenno ei toimi ilman kontaktisormia. Kontaktisormilta vaaditaan mahdollisimman pientä pinta-alaa, mutta myös riittävän

hyvää virranjohtokykyä [20, s. 15]. Kontaktisormien poikkipinta-alan pienentyessä niiden virranjohtokyky kuitenkin heikkenee.

4.7 Kolmiliitosaurinkokennon sisäiset oikosulut

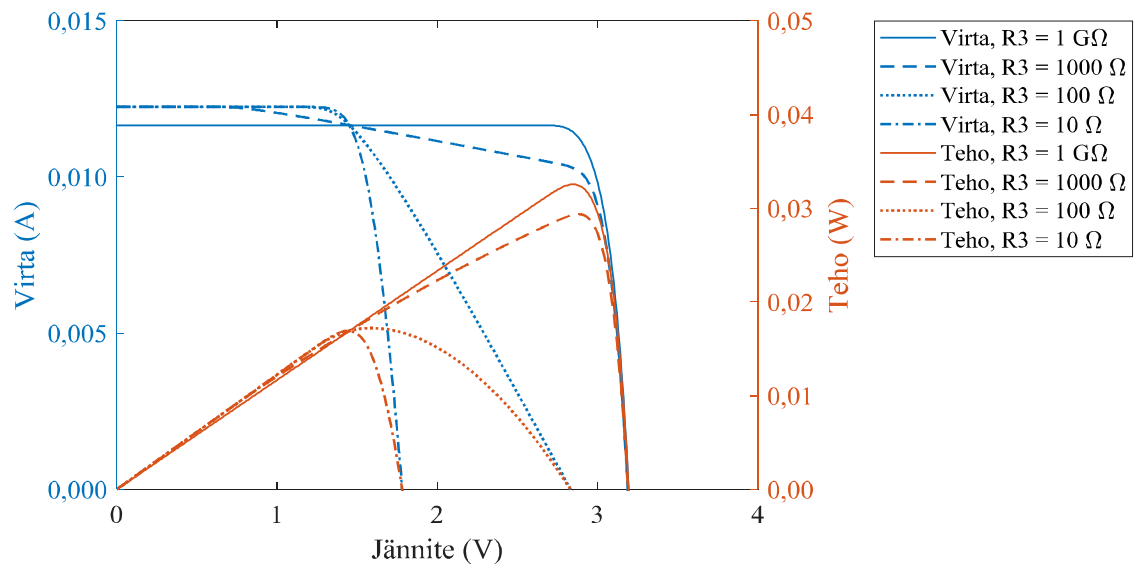
Moniliitosaurinkokennojen epäideaalisen valmistuksen tai käsittelyn johdosta aurinkokenno voi vaurioitua tai sen kerrosrakenteeseen voi päätyä epäpuhtauspartikkeleita. Tällaiset epäideaalisuudet voivat aiheuttaa oikosulkuja moniliitosaurinkokennon liitoksiin. Edellä mainittujen epäideaalisuuksien johdosta syntyvät oikosulut voivat vaikuttaa moniliitosaurinkokennon suorituskykyyn. Osa aurinkokennon tuottamasta virrasta voi kulkea oikosulun kautta, mikä saattaa pienentää aurinkokennon tuottamaa tehoa.

Kuvassa 30 on kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalli, johon asetettiin oikosulkuvastukset R3, R4 ja R5 liitoksien 1–3 rinnalle. Oikosulkuvastuksien vastusarvoa muuttamalla voitiin simuloida erisuuruisten oikosulkujen vaikutuksia kolmiliitosaurinkokennossa. Vastusarvoltaan pieni oikosulkuvastus saattoi ohittaa liitoksen lähes kokonaan, kun taas vastusarvoltaan suuri oikosulkuvastus ei juurikaan haitannut aurinkokennon toimintaa.



Kuva 30. Yhden kolmiliitosaurinkokenno simulaatiomalli, jossa kolmiliitosaurinkokennon liitoksien rinnalle on asetettu oikosulkuvastukset R3, R4 ja R5.

Kuvassa 31 on yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisien kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät tilanteesta, jossa simuloitiin liitoksen 1 rinnalla olevaa oikosulkua $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 . Oikosulkuvastuksen R_3 arvoiksi asetettiin $1 \text{ G}\Omega$, $1000 \text{ }\Omega$, $100 \text{ }\Omega$ ja $10 \text{ }\Omega$, missä $1 \text{ G}\Omega$ oikosulku vastasi tilannetta, jossa oikosulkua ei ole. Simuloidun kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, oikosulkuvirrantiheys, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täytekerroin ja hyötysuhde on esitetty taulukossa 11.



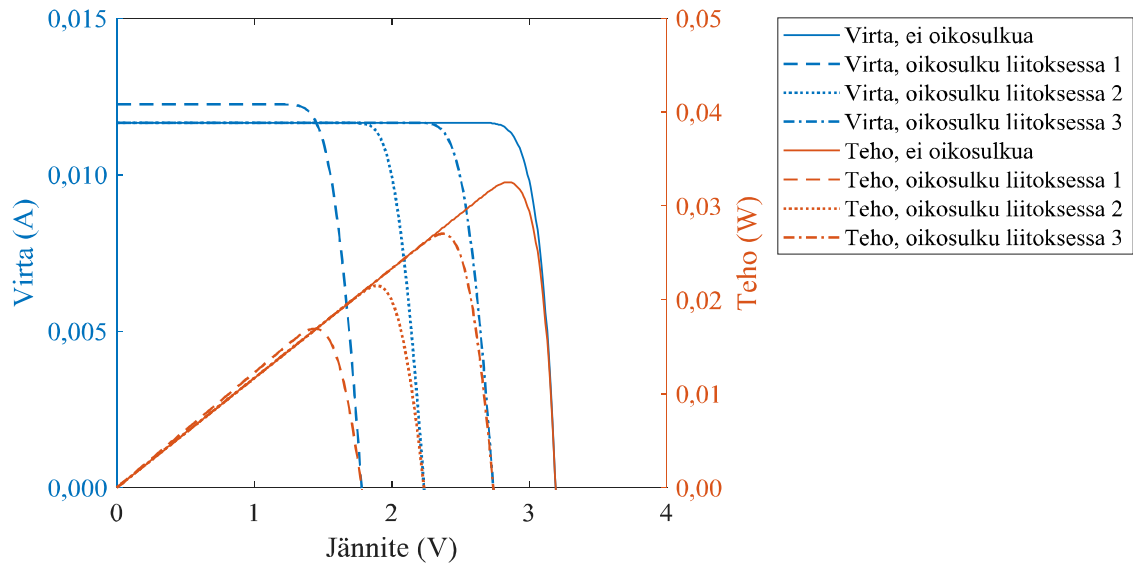
Kuva 31. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisien kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 . Päällimmäisen liitoksen rinnalle asetettiin oikosulkuvastus R_3 , jonka arvoa muutettiin $1 \text{ G}\Omega$:sta $10 \text{ }\Omega$:iin.

Taulukko 11. Oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekerroimet ja hyötysuhteet yhdelle $0,91 \text{ mm}^2$ kokoiselle kolmiliitosaurinkokennolle päällimmäisen liitoksen rinnalla olleen oikosulkuvastuksen R_3 erisuuruuksilla arvoilla $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

$R_3 \text{ (}\Omega\text{)}$	$I_{sc} \text{ (A)}$	$J_{sc} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$P_{MP} \text{ (W)}$	FF	$\eta \text{ (}\%\text{)}$
$1 \cdot 10^9$	0,0117	1,2813	3,20	0,0325	0,8721	35,76
1000	0,0122	1,3453	3,19	0,0294	0,7520	32,27
100	0,0122	1,3453	2,84	0,0172	0,4949	18,91
10	0,0122	1,3453	1,79	0,0169	0,7722	18,60

Kuvan 31 käyristä ja taulukon 11 arvoista huomataan, että oikosulku liitoksessa 1 pienensi kolmiliitosaurinkokennon tuottamaa tehoa. Täytekerroin ja hyötysuhde pienenevät myös. Huomattiin myös, että oikosulkuvastuksen vastusarvon ollessa $10 \text{ }\Omega$ oikosulku se päällimmäisen liitoksen lähes kokonaan. Tällöin kolmiliitosaurinkokennon avoimen pii-

rin jännite pieni oikosulkuvastuksella ohitetun liitoksen avoimen piirin jännitteen verran. Oikosulun vaikutukset tuotettuun tehoon olivat suurimmat liitoksessa 1, sillä liitosten 2 ja 3 avoimen piirin jännitteet olivat pienempiä kuin liitoksen 1 avoimen piirin jännite. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 32, jossa yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon liitokset 1–3 oikosuljettiin vuorotellen vastusarvoltaan 10Ω suuruisella oikosulkuvastuksella. Taulukkoon 12 on listattu kuvan 32 tulokset numeerisessa muodossa.



Kuva 32. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon liitokset 1–3 oikosuljettiin vuorotellen 10Ω suuruisella vastuksella lämpötilassa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja valon intensiteetillä 100 kW/m^2 . Vertailun vuoksi kuvassa on myös yhtenäisellä viivalla kolmiliitosaurinkokennon IV- ja PV-käyrät, jossa oikosulkua ei ole.

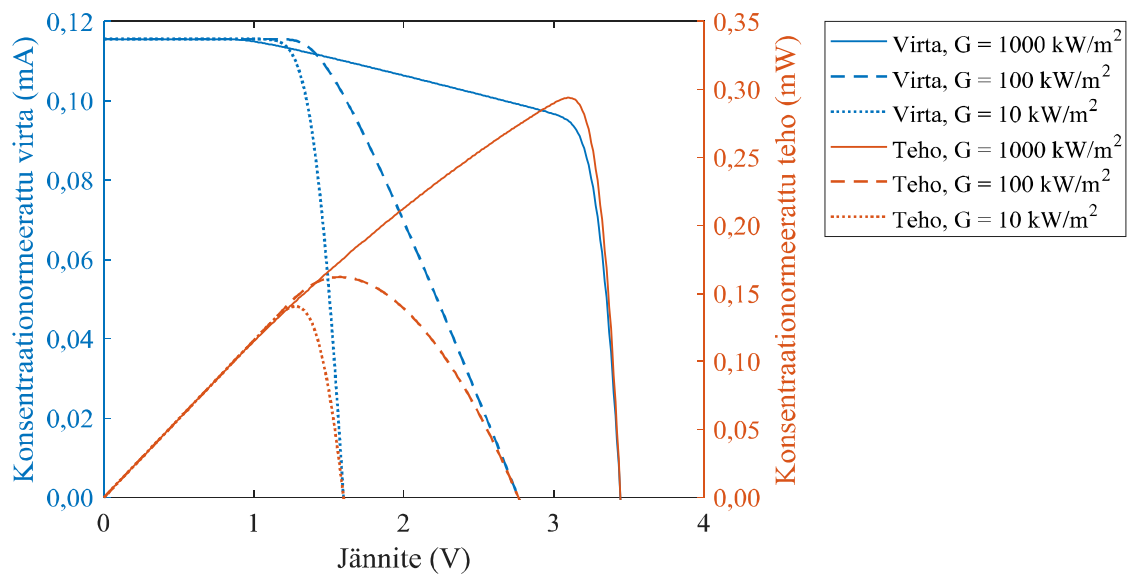
Taulukko 12. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täyttekertoimet ja hyötysuhteet, kun kolmiliitosaurinkokennon liitokset oikosuljettiin vuorotellen 10Ω oikosulkuvastuksella $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 100 kW/m^2 .

Oikosulku	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
Ei oikosulkua	0,0117	1,2813	3,20	0,0325	0,8721	35,76
Liitoksessa 1	0,0122	1,3453	1,79	0,0169	0,7722	18,60
Liitoksessa 2	0,0117	1,2813	2,24	0,0215	0,8233	23,63
Liitoksessa 3	0,0117	1,2813	2,74	0,0270	0,8462	29,71

Kolmiliitosaurinkokennon liitoksien sarjaan kytkennässä oikosulkuvirta ei pienentynyt, vaikka yksi liitoksista ohitettiin oikosulkuvastuksella. Kuvasta 32 nähdään, että oikosulkuvirta jopa kasvoi hieman, kun päällimmäinen liitos eli liitos 1 ohitettiin oikosulkuvastuksella. Tämä johtui siitä, että kyseisessä kolmiliitosaurinkokennossa päällimmäinen liitos tuottaa vähemmän virtaa, kuin sen alla olevat liitokset. Kolmiliitosaurinkokennossa

vähiten virtaa tuottava liitos rajoittaa muiden liitosten tuottamaa virtaa. Kun päällimmäisen liitoksen rinnalla on sopivan kokoinen oikosulkuvastus, kuten kuvassa 31 oleva 1000Ω oikosulkuvastus, niin alempien liitoksien tuottama virta voi kulkea ensin oikosulkuvastuksen läpi, mutta jännitteen noustessa osa virrasta kulkee myös päällimmäisen liitoksen läpi. Päällimmäisen liitoksen rinnalla oleva oikosulkuvastus voi kasvattaa myös aurinkokennon sarjaresistanssia, kun alempien liitoksien tuottama virta kulkee oikosulkuvastuksen läpi.

Kuvassa 33 simuloitiin yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*- ja *PV*-käyrät, kun kolmiliitosaurinkokennossa oli alaluvussa 4.6 esitetyn kuvan 27 mukaiset kontaktisormet 5,6 % peittopinta-alalla, sekä 100Ω oikosulkuvastus päällimmäisen liitoksen rinnalla. Kolmiliitosaurinkokenno simuloitiin 10 kW/m^2 , 100 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 valon intensiteeteillä $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Simulaatiossa käytettyjen erisuuruisten valon intensiteettien vuoksi virta- ja tehoakselit ovat konsentraationormeerattu kuvassa 33 yhden auringon säteilytysvoimakkuuteen 1000 W/m^2 . Oikosulkuvirtojen, avoimen piirin jännitteiden ja maksimitehojen lisäksi taulukossa 13 on esitetty myös simuloitujen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrantiheydet, täytekertoimet sekä hyötysuhteet.



Kuva 33. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon *IV*- ja *PV*-käyrät $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteeteillä (G) 10 kW/m^2 , 100 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 . Kontaktisormet peittivät 5,6 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta ja kolmiliitosaurinkokennon päällimmäisen liitoksen rinnalla oli vastusarvoltaan 100Ω suuruinen oikosulkuvastus. Virta- ja tehoakselit ovat konsentraationormeerattu yhden auringon säteilytysvoimakkuuteen 1000 W/m^2 .

Taulukko 13. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täyttekertoimet ja hyötysuhteet erisuuruksilla valon intensiteeteillä (G), kun kolmiliitosaurinkokennon päällimmäinen liitos oikosuljettiin vastusarvoltaan 100Ω suuruksella oikosulkuvas-
tuksella $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Kolmiliitosaurinkokennon kontaktisormet peittivät $5,6 \%$ kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta.

$G \text{ (kW/m}^2\text{)}$	$I_{sc} \text{ (A)}$	$J_{sc} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$P_{MP} \text{ (W)}$	FF	$\eta \text{ (\%)}$
1000	0,1156	12,70	3,45	0,2939	0,7370	32,29
100	0,0116	1,270	2,77	0,0162	0,5061	17,80
10	0,0012	0,127	1,60	0,0014	0,7599	15,44

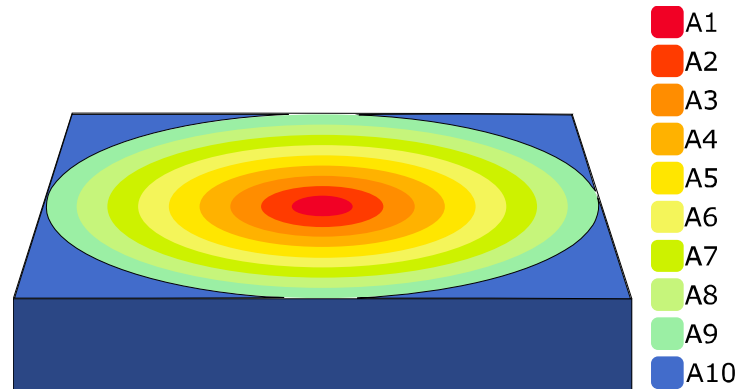
Kuvasta 33 ja taulukosta 13 huomataan, että oikosulun merkitys on vähäisempi korkealla 1000 kW/m^2 valon intensiteetillä kuin pienemmällä 100 kW/m^2 ja 10 kW/m^2 valon intensiteeteillä. 1000 kW/m^2 valon intensiteetillä hyötysuhde pienentyi oikosulun takia vain 4% kun taulukon 13 hyötysuhdetta $32,29 \%$ verrataan taulukossa 10 esitettyyn hyötysuhteeseen $36,29 \%$. Kun taas 100 kW/m^2 valon intensiteetillä kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhde oli oikosulun vaikutuksesta enää vain $17,80 \%$ ja 10 kW/m^2 valon intensiteetillä $15,44 \%$. Jos moniliitosaurinkokennossa on oikosulku, niin suurilla valon intensiteeteillä voi olla vaikea huomata mistä moniliitosaurinkokennon pienentynyt hyötysuhde johtuu. Oikosulun havaitseminen voi olla haastavaa, sillä moniliitosaurinkokennon IV -käyrä voi olla lähes saman muotoinen kuin ilman oikosulkua. Tällaisessa tapauksessa oikosulun havaitsemista auttaa IV -käyrän mittaus alhaisemmalla valon intensiteetillä.

4.8 Linssin muodostama valon epätasainen intensiteettijakauma

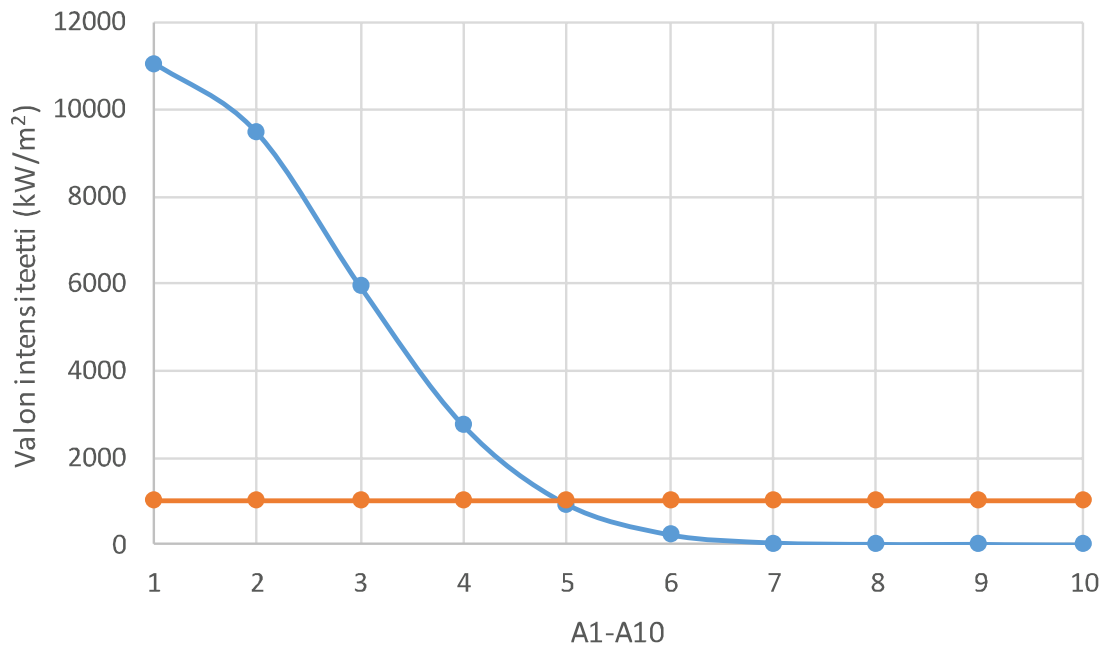
Auringonvaloa keskittävässä aurinkokennoteknologioissa käytetään usein Fresnel-linssiä, joka aiheuttaa epätasaisen valon intensiteettijakauman aurinkokennolle. Valon intensiteettijakauma on tyypillisesti muodoltaan normaalijakauma [20, s. 97–98]. Valon intensiteetti aurinkokennon keskellä voi olla useita kertaluokkia suurempi kuin aurinkokennon reunoilla. [9][13][33]

Kuvassa 34 on esitettyä aurinkokennoa, jonka pinnalla suurin valon intensiteetti on merkitty punaisella ja pienin valon intensiteetti on merkitty sinisellä. Valon epätasaisesta intensiteettijakaumasta mallinnettiin siten, että yksi kolmiliitosaurinkokenno jaettiin kuvan 34 mukaisesti pinta-aloihin $A1$ – $A10$, jotka on esitetty myös kuvassa 35 valon intensiteetin funktiona. Sinisellä värillä on kuvaan 35 merkitty aloille $A1$ – $A10$ simulaatiossa asetetut normaalijakaumaa noudattavat valon intensiteettilukemat ja vertailun vuoksi oranssilla värillä on merkitty kolmiliitosaurinkokennon tasainen 974 kW/m^2 valon intensiteettijakauma. Aurinkokennolle saapuva kokonaissäteily oli yhtä suuri molemmissa tilanteissa.

Valon intensiteetti oli aurinkokennon keskellä alueella *A1* noin $11\,000\text{ kW/m}^2$, josta se pieneni noin 41 W/m^2 :iin siirryttäessä lähemmäksi aurinkokennon reunaa kohti aluetta *A10*.

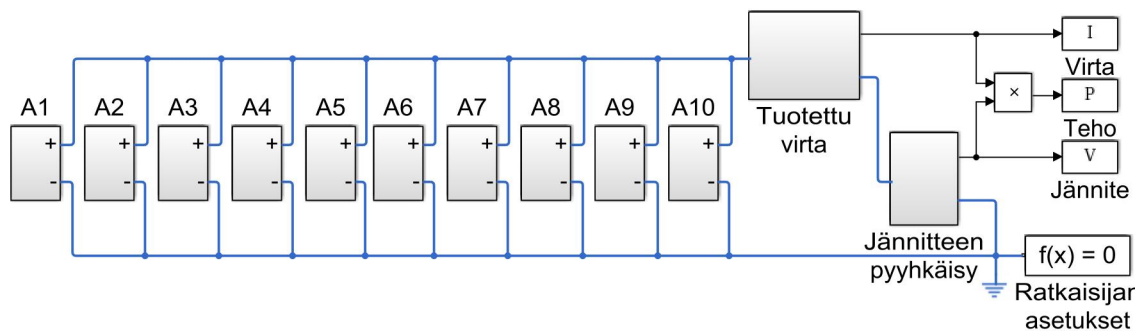


Kuva 34. Auringonvaloa keskittävän linssin aiheuttama valon epätasainen intensiteettijakauma aurinkokennon pinnalla. Aurinkokennon pinta on jaettu aloihin, joista punaisella värillä on merkitty ala, jossa valon intensiteetti on suurin.



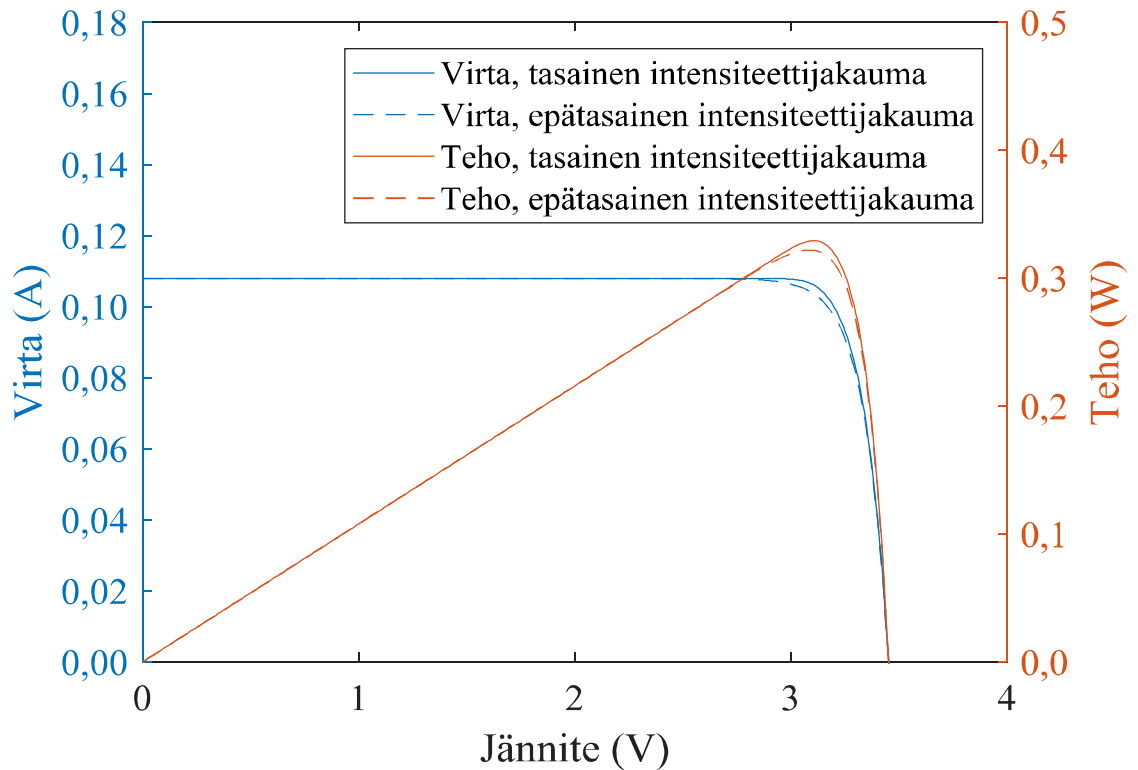
Kuva 35. Kuvaan on merkitty sinisellä värillä kymmeneen alueeseen jaetun yhden $0,91\text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon epätasainen valon intensiteettijakauma. Pisteet *A1–A10* vastaavat kuvan 30 alueita *A1–A10*. Valon intensiteetit pisteissä *A1–A10* ovat $11\,000\text{ kW/m}^2$, $9\,500\text{ kW/m}^2$, $6\,000\text{ kW/m}^2$, $2\,800\text{ kW/m}^2$, 940 kW/m^2 , 230 kW/m^2 , 43 kW/m^2 , $5,8\text{ kW/m}^2$, $0,57\text{ kW/m}^2$ ja $0,041\text{ kW/m}^2$. Oranssilla värillä on merkitty kolmiliitosaurinkokennon tasainen 974 kW/m^2 valon intensiteettijakauma.

Valon epätasaisen intensiteettijakauman vaikutusta mallinnettiin kymmenen rinnankytketyn kolmiliitosaurinkokennon avulla kuvan 36 mukaisesti. Kuvassa 36 kymmenen kolmiliitosaurinkokennon yhteenlaskettu pinta-ala vastasi yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon pinta-alaa. $0,91 \text{ mm}^2$ pinta-ala jaettiin kymmenelle kolmiliitosaurinkokennolle kuvan 34 mukaisesti, siten että suurimman valon intensiteetin kokevalla kolmiliitosaurinkokennolla oli pienin pinta-ala ja pienimmän valon intensiteetin kokevalla kolmiliitosaurinkokennolla oli suurin pinta-ala. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon sarjaresistanssi $0,48 \ \Omega$ jaettiin myös kymmeneen osaan, siten että resistanssi oli suurin pinta-alaltaan pienimmällä alueella $A1$ ja pienin pinta-alaltaan suurimmalla alueella $A10$.



Kuva 36. Kymmeneen osaan jaetun yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon simulaatiomalli. Kolmiliitosaurinkokennon muodostui kymmeneestä rinnankytketystä kolmiliitosaurinkokennosta, joiden pinta-alat ovat $A1$ – $A10$.

Kuvan 36 simulaatiomalli simuloitiin ja simulaation IV - ja PV -käyrät on esitetty kuvassa 37. Kuvaan 37 on yhtenäisellä viivalla simuloitu tasaisella 974 kW/m^2 valon intensiteetillä $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät. Katkoviivalla on simuloitu epätasaisen valon intensiteetin kokevan $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV - ja PV -käyrät. Taulukkoon 14 on listattu simulaation oikosulkuvirrat, oikosulkuvirrantiheydet, avoimen piirin jännitteet, maksimitehot, täytekertoimet ja hyötysuhteet.



Kuva 37. 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon IV- ja PV-käyrät 25 °C lämpötilassa tasaisella ja epätasaisella valon intensiteettijakaumalla. Aurinkokennolle saapuva kokonaissäteily 974 kW/m² oli yhtä suuri molemmissa tilanteissa.

Taulukko 14. 0,91 mm² kokoisen kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirta, oikosulkuvirta, avoimen piirin jännite, maksimiteho, täyterroin ja hyötysuhde 25 °C lämpötilassa 974 kW/m² tasaisella ja epätasaisella valon intensiteettijakaumalla.

Valon intensiteettijakauma	I_{sc} (A)	J_{sc} (A/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{MP} (W)	FF	η (%)
Tasainen	0,1079	11,8556	3,46	0,3292	0,8819	36,58
Epätasainen	0,1079	11,8583	3,46	0,3218	0,8620	35,76

Linssin aiheuttaman epätasaisen valon intensiteettijakauman vaikutuksesta kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho oli 7,4 mW pienempi verrattuna tasaisen intensiteettijakauman kokevan kolmiliitosaurinkokennon maksimitehoon. Simulaatiotuloksista havaittiin myös, että kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhde pieneni lähes 1 % verran epätasaisella valon intensiteettijakaumalla verrattuna tasaiseen valon intensiteettijakaumaan. Hyötysuhteen ja tuotetun tehon pienenemistä voidaan minimoida käyttämällä laadukkaita linssijä. Tällöin linssistä koituvat kustannukset voivat kuitenkin nousta. [20, s. 88]

5. CPV-AURINKOKENNON MITTAUKSET

Kolmiliitosaurinkokennojen sähköistä käyttäytymistä mitattiin ulkomittausasemalla ja aurinkosimulaattorilla valoa keskittävää linssiä käyttäen. Mittauksissa tarkasteltiin linssin ja aurinkokennon välisiä kohdistusvirheitä, sekä kolmiliitosaurinkokennoilla saavutettuja maksimitehoja ja oikosulkuvirtoja. Mittauksissa käytettiin pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoista Fresnel-linssiä ja pinta-alaltaan $0,91 \text{ mm}^2$ kokoista kolmiliitosaurinkokennoa.

5.1 Aurinkosimulaattori

Moniliitosaurinkokennoja mitattiin laboratorio-olosuhteissa teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorilla, jonka tuottama valo jäljittelee auringonvaloa. Aurinkosimulaattorin linssien avulla valon intensiteetti voitiin kasvattaa jopa 1000 kW/m^2 . Aurinkosimulaattorin avulla voitiin mitata testattavana olevan aurinkokennon oikosulkuvirta ja avoimen piirin jännite. Muut parametrit kuten maksimiteho, virrantiheys, täyterroin ja hyötysuhde saatiin selville laskemalla.

Aurinko ei ole Maasta katsottuna täysin pistemäinen valonlähde, sillä auringonvalon hajaantumiskulma on noin $0,266^\circ$ Auringon keskimääräisellä etäisyydellä Maasta [20, s. 294]. Auringonvaloa jäljittelevä aurinkosimulaattorin valo ei korvaa täysin auringonvaloa, sillä aurinkosimulaattoreilla valon hajaantumiskulmat voivat olla 5–10 kertaa suurempia [27][30]. Aurinkosimulaattorin valonlähteenä toimiva lamppu ei ole pistemäinen valonlähde. Teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorissa valon hajaantumiskulma oli noin $1,3^\circ$, mikä on hyvä luku aurinkosimulaattorille, mutta todelliseen auringonvaloon verrattuna hajaantumiskulma on varsin suuri [27][30]. Aurinkosimulaattorin epäideaalisuuksien johdosta aurinkosimulaattorilla mitattujen aurinkokennojen mittaus tulokset eivät vastaa täysin todellisen auringonvalon avulla mitattujen aurinkokennojen mittaustuloksia.

5.2 Ulkomittausasema

Tampereen teknillisen yliopiston L-siiven katolle rakennettiin CPV-aurinkopaneelien ulkomittausasema. Ulkomittausasemalla moniliitosaurinkokennoista koostuvien aurinkopaneelien suorituskykyä voidaan mitata todellisen auringonvalon avulla. Testattavana oleva aurinkopaneeli tai aurinkokenno voidaan kiinnittää ulkomittausasemalla aurinkoseuraimeen. Mittausasema koostui Suntracer ST44M2V4P aurinkoseuraimesta, Solarxon ES-90P piiaurinkopaneelistä, Sznajder energy plus 960-07 akustosta ja sähkökaapista kytkentöineen. Sähkökaapissa oli tarvittava elektroniikka ja sähkölaitteet, kuten vaihtovirtainvertteri, latausyksikkö ja muuntaja. Piiaurinkopaneelin avulla tuotettiin tarvittava sähköenergia aurinkoseuraimelle.

Testattavana olleen moniliitosaurinkokennon virta ja jännite mitattiin ulkomittausasemalla virta- ja jännitemittareiden avulla. Mittaukset ulkomittausasemalla todellisella auringonvalolla tuottavat hyödyllistä mittaustietoa. Ulkoasemamittausten avulla aurinkokennojen ja aurinkopaneelien sähköistä käyttäytymistä voidaan mallintaa paremmin todellisissa olosuhteissa. Ulkomittausaseman viimeistely jäi hieman kesken kiireellisen aikataulun ja huonojen sääolosuhteiden vuoksi. Ulkomittausasemalle tullaan toteuttamaan lähitulevaisuudessa myös elektroninen mittaussiiri, jonka avulla testattavana olevan aurinkopaneelin tai aurinkokennon *IV*-käyrän mittausta voidaan automatisoida. Mitatulle *IV*-käyrälle toteutetaan myös graafinen esitys mahdollisesti Raspberry Pi -tietokoneen ja Labview-ohjelmiston avulla.

5.3 Linssin ja aurinkokennon välinen kohdistusvirhe

Valoa keskittävän linssin ja aurinkokennon välinen kohdistusvirhe vaikuttaa merkittävästi moniliitosaurinkokennon tuottamaan tehoon. Optimaalisessa tilanteessa linssin polttopiste on kohdistettu aurinkokennon pinnan keskelle. Kohdistusvirheestä tai tärähdyksestä johtuen linssi voi päätyä epäideaaliseen asentoon aurinkokennon suhteen, jolloin linssin polttopiste ei osu aurinkokennon pinnan keskelle. Valoa keskittävän linssin optimaalinen paikka täytyy kalibroida tarkasti aurinkokennon suhteen ennen CPV-aurinkopaneelin asentamista, jotta aurinkopaneelin tuottama teho saadaan maksimoitua. Pahimmassa tapauksessa voi syntyä tulipalo- tai kuumenemisriski, jos linssin polttopiste osuu aurinkokennoa ympäröiviin rakenteisiin.

Teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorin avulla mitattiin muun muassa CPV-aurinkokennon oikosulkuvirta ja maksimiteho. Valoa keskittävä linssi saatiin kohdistettua aurinkokennon yläpuolelle mikrometriruuvien avulla aurinkokennon oikosulkuvirran ollessa maksimissaan. Linssin kohdistaminen aurinkosimulaattorilla osoittautui haastavaksi tehtäväksi aurinkosimulaattorin epäideaalisuuksista johtuen. Aurinkosimulaattorilla valon hajaantumiskulma oli niin suuri, että valoa kohdistava linssi ei muodostanut selvää polttopistettä aurinkokennon pinnalle. Lisäksi mikrometriruuvien säädöt olivat niin jäykkiä, että mittausalusta saattoi liikahtaa mikrometriruuveja säätäessä. Linssin kohdistaminen onnistui huomattavasti nopeammin ulkomittausasemalla, jossa valon lähteenä oli Aurinko. Ulkomittausasemalla auringonvalon hajaantumiskulma oli riittävän pieni, jolloin valoa keskittävä linssi muodosti selvän polttopisteen aurinkokennon pinnalle.

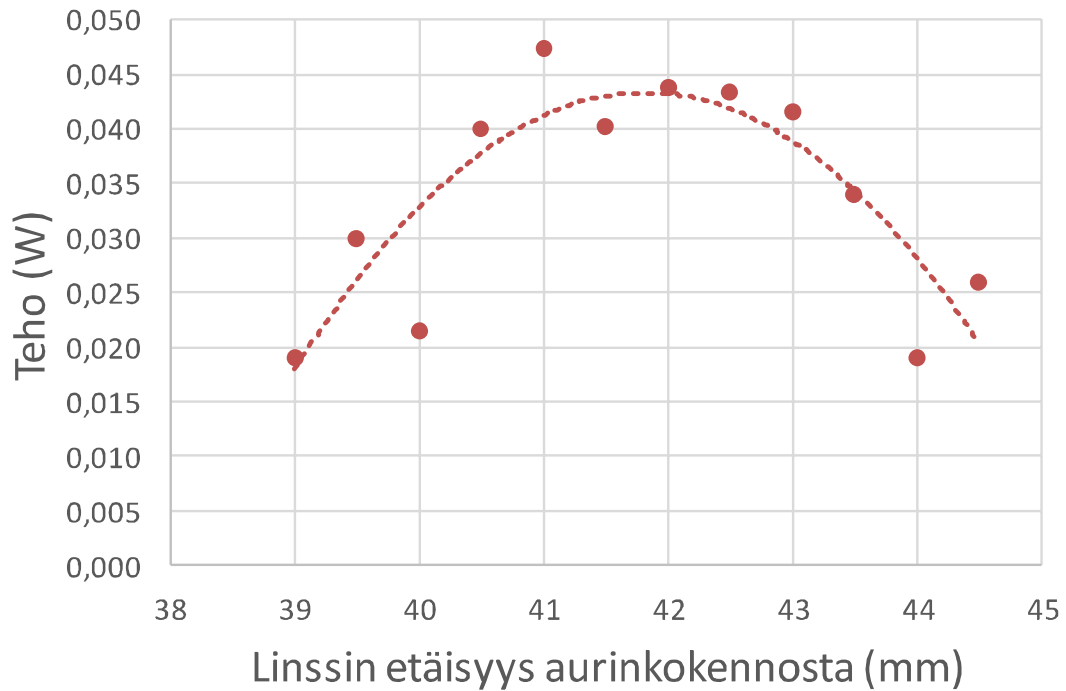
Laboratoriomittausten kohteena oli yksi $0,91 \text{ mm}^2$ kokoinen kolmiliitosaurinkokenno, jonka yhteydessä käytettiin pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoista valoa keskittävää Fresnel-linssiä. Linssin etäisyys kolmiliitosaurinkokennosta oli 42 mm. Aurinkosimulaattorilla mitattiin kohdistusvirheen vaikutusta kolmiliitosaurinkokennon tuottamaan tehoon. Kuvan 38 käyrästä nähdään kolmiliitosaurinkokennon tuottama teho valoa keskittävän linssin paikan funktiona. Linssiä siirrettiin mikrometriruuvien avulla kolmiliitosaurinkokennon yli horisontaalisessa suunnassa 0,1 mm välein.



Kuva 38. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon teho valoa keskittävän linssin horisontaalisen paikan funktiona $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa aurinkosimulaattorin valon intensiteetillä 1000 W/m^2 . Pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoisen linssin etäisyys kolmiliitosaurinkokennosta oli 42 mm .

Kolmiliitosaurinkokennon tuottama teho oli suurimmillaan noin 35 mW linssin polttopisteen osuessa kolmiliitosaurinkokennon keskelle. Kuvasta 38 nähdään että $0,5 \text{ mm}$ kohdistusvirhe aurinkokennon ja linssin välillä laski tehon noin 30 mW :iin, joka oli noin 86% mittauksessa saavutetusta maksimitehosta.

Kuvassa 39 on esitetty aurinkosimulaattorilla mitatun yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen CPV-kolmiliitosaurinkokennon teho pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoisen valoa keskittävän linssin vertikaalisen paikan funktiona. Linssin polttopiste kohdistettiin kolmiliitosaurinkokennon keskelle, jonka jälkeen linssin etäisyyttä kolmiliitosaurinkokennosta lähennettiin ja loitonnettiin mikrometriruuvien avulla $0,5 \text{ mm}$ välein.



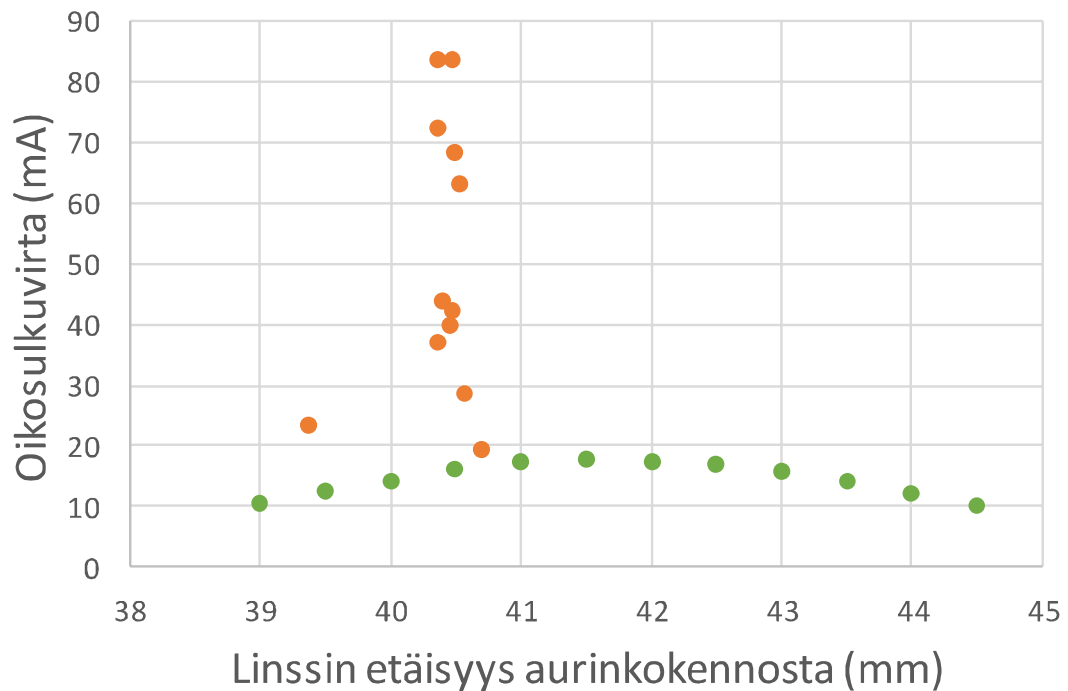
Kuva 39. Yhden $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisen kolmiliitosaurinkokennon teho pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoisen valoa keskittävän linssin vertikaalisen paikan funktiona $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa aurinkosimulaattorin valon intensiteetillä 1000 W/m^2 .

Valoa keskittävää linssiä lähentämällä ja loitontamalla havaittiin, että linssin optimaalinen etäisyys kolmiliitosaurinkokennosta oli noin 42 mm. Tällöin kolmiliitosaurinkokennon tuottama teho oli noin 44 mW. Mittauksista havaittiin myös, että kolmiliitosaurinkokennon tuottama teho ei ollut yhtä muutosherkkä linssin ja aurinkokennon välisille vertikaalisille siirtymille kuin horisontaalisille siirtymille. Yhden millimetrin vertikaalinen siirtymä linssin ja aurinkokennon välillä laski kolmiliitosaurinkokennon tuottaman tehon noin 90 %:iin maksimitehosta, kun taas 1 mm suuruinen linssin ja aurinkokennon välinen horisontaalinen siirtymä laski kolmiliitosaurinkokennon tuottaman tehon noin 45 %:iin maksimitehosta.

Kolmiliitosaurinkokennon ja valoa keskittävän linssin etäisyys aurinkosimulaattorin valon lähteestä vaikutti myös jonkin verran kolmiliitosaurinkokennon tuottamaan tehoon. Uudelleenkohdistuksien jälkeen kolmiliitosaurinkokennosta saatiin mitattua 51,11 mW maksimiteho kolmiliitosaurinkokennon linssin ollessa 67,5 cm etäisyydellä aurinkosimulaattorin linssistä. Linssien välisen etäisyyden ollessa 127,7 cm kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho oli 52,02 mW ja linssien välisen etäisyyden ollessa 157,5 cm kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho oli 49,21 mW. Aurinkokennon säätöalustasta johtuvan epävakauden vuoksi on mahdollista, että kaikissa mittauksissa ei saavutettu absoluuttista maksimitehoa.

CPV-kolmiliitosaurinkokennon aurinkosimulaattorimittausten ja ulkomittausasemalla suoritettujen mittausten mittaustuloksien välillä oli eroa. Kuvassa 40 on esitetty yhden CPV-kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirrat pinta-alaltaan 1296 mm^2 kokoisen valoa

keskittävän linssin vertikaalisen paikan funktiona mitattuna teholtaan 7 kW OAI Trisol aurinkosimulaattorilla ja todellisella auringonvalolla ulkomittausasemalla. Kolmiliitosaurinkokennon pinta-ala oli $0,91 \text{ mm}^2$.



Kuva 40. Oikosulkuvirta linssin eri etäisyyksillä kolmiliitosaurinkokennosta. Aurinkosimulaattorilla mitatut arvot $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa valon intensiteetillä 1000 W/m^2 on merkitty vihreällä ja oranssilla on merkitty 1000 W/m^2 normalisoidut ulkomittausasemalla mitatut oikosulkuvirran arvot. Aurinkokennon lämpötila ulkomittausasemalla oli noin $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Kolmiliitosaurinkokennon pinta-ala oli $0,91 \text{ mm}^2$ ja valoa keskittävän linssin pinta-ala oli 1296 mm^2 .

Ulkomittausasemalla valoa keskittävän linssin avulla saavutettiin korkeampi oikosulkuvirta kyseiselle kolmiliitosaurinkokennolle kuin aurinkosimulaattorilla. Eroa selittää muun muassa edellä todettu aurinkosimulaattorin epäideaalinen käyttäytyminen. Linssin ja aurinkokennon kohdistaminen oli ulkomittausasemalla vaivatonta, sillä linssin keskittämä auringonvalo muodosti aurinkokennon pinnalle selvän valospotin. Aurinkosimulaattorilla kohdistaminen oli haastavampaa, sillä linssin keskittämä valospotti aurinkokennon pinnalla oli epäselvä ja hajaantunut aurinkosimulaattorin valon suuren hajaantumiskulman vuoksi. Ulkomittausasemalla tullaan jatkossa mittaamaan enemmän CPV-aurinkokennoja ja CPV-aurinkopaneeleja. Useammat ulkomittausaseman mittaustulokset voisivat auttaa ymmärtämään eroja aurinkosimulaattorimittauksien ja ulkomittausasemamittauksien välillä.

6. YHTEENVETO

Diplomityössä luotiin Mathworksin Matlab/Simulink-ohjelmistolla simulaatiomalli korkean hyötysuhteen CPV-kolmiliitosaurinkokennolle ja kolmiliitosaurinkokennoista koostuvalle CPV-aurinkopaneelille. Kolmiliitosaurinkokennojen ja CPV-aurinkopaneelien ominaisuuksia ja käyttäytymistä käsiteltiin useiden simulaatioiden ja mittausten avulla. Diplomityössä tutkittuihin aiheisiin kuuluivat CPV-aurinkopaneelien kytkentätopologiat, CPV-aurinkopaneelin epätasainen lämpötilajakauma, CPV-aurinkopaneelin osittainen varjostuminen, kolmiliitosaurinkokennon kontaktisormet, kolmiliitosaurinkokennon sisäiset oikosulut, kolmiliitosaurinkokennon epätasainen valon intensiteettijakauma sekä linssin ja kolmiliitosaurinkokennon väliset kohdistusvirheet. Monia käsiteltyjä asioista olisi voinut tutkia laajemmin, mutta diplomityössä tehdyn taustatyön avulla yksittäisiin ongelma-kohtiin on kuitenkin mahdollista perehtyä jatkossa vaivattomasti.

Simulaatiomalleja suunniteltaessa huomattiin, että sekä sarjaan että rinnankytketyistä aurinkokennoista koostuvien aurinkopaneelien mallintaminen ei ollut ongelmaton tehtävä. Simulaatioita monimutkaisti erityisesti moniliitosaurinkokennoista koostuvan aurinkopaneelin mallintaminen. Jokaisen moniliitosaurinkokennon liitoksia oli mallinnettava erillisillä aurinkokenno-komponenteilla, jotka poikkesivat ominaisuuksiltaan hieman toisistaan. Diplomityössä toteutetut aurinkokennojen ja aurinkopaneelien simulaatiomallit vastasivat kuitenkin kokeellisia mittauksia ja simulaatiomallien todettiin toimivan.

Simulaatiomallin avulla simuloitiin aurinkopaneelin, sekä yksittäisten kolmiliitosaurinkokennojen sähköistä käyttäytymistä pääasiassa valon intensiteeteillä 100 kW/m^2 ja 1000 kW/m^2 lämpötilavälillä $20\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$. Mittausten ja simulaatioiden avulla tutkimuksen kohteena olevalle kolmiliitosaurinkokennolle määritettiin oikosulkuvirrantiheyden, avoimen piirin jännitteen ja hyötysuhteen lämpötilakertoimet valon intensiteetillä 100 kW/m^2 . Tulokset olivat yhteneviä optoelektronikan tutkimuskeskuksessa aikaisemmin julkaistujen lämpötilakertoimien kanssa [4]. Lisäksi määritettiin oikosulkuvirran, täytekertoimen ja maksimitehon lämpötilakertoimet. Pinta-alaltaan $0,91 \text{ mm}^2$ kokoisella kolmiliitosaurinkokennolla maksimitehon lämpötilakertoimeksi määritettiin noin $-48 \text{ } \mu\text{W}/^\circ\text{C}$ ja hyötysuhteen lämpötilakertoimeksi noin $-5,3 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^\circ\text{C}$. Lämpötilakertoimien havaittiin olevan yksiliitoksisten piiaurinkokennojen lämpötilakertoimia alhaisemmat. Moniliitosaurinkokennoteknologiat sopivatkin tästä syystä erityisesti alueille, jossa ilmasto on kuuma.

Diplomityössä suoritettujen simulaatioiden perusteella aurinkopaneelin epätasaisella lämpötilajakaumalla oli pieni vaikutus aurinkopaneelin hyötysuhteeseen. Epätasaisen lämpötilajakauman vaikutus aurinkopaneelissa jäi oletettua pienemmäksi hyötysuhteen ollessa vain noin 0,1 % suurempi verrattuna tasaisen lämpötilajakauman omaavaan au-

rinkopaneeliin. Aurinkopaneelin tasaisen ja epätasaisen lämpötilajakauman simulaatiotulokset voisivat olla erilaiset käytettäessä erilaisia aurinkokennojen kytkentätopologioita. Tässä työssä tarkasteltiin vain 3s3r kytkentätopologiaa noudattavan yhdeksästä aurinkokennosta koostuvan aurinkopaneelin epätasaisesta lämpötilajakaumasta. Aurinkopaneelin epätasaisesta lämpötilajakaumasta voisi jatkossa tehdä kattavamman vertailun aurinkokennojen erilaisilla kytkentätopologioilla, sekä aurinkopaneeleilla, joissa aurinkokennoja olisi suurempi lukumäärä.

Aurinkopaneelin erilaisia varjostustilanteita on hyvin paljon. Tässä diplomityössä tarkasteltiin niin ikään vain yhtä varjostustilannetta yhdeksän aurinkokennon aurinkopaneelissa, jossa oli 3s3r kytkentätopologia. Simulaatioiden avulla havaittiin, että osittaisessa varjostustilanteessa aurinkopaneelista voidaan saada suurempi teho ohitusdiodeja käyttämällä. Alaluvussa 4.5 käsiteltiin osittaista varjostustilannetta, jossa ohitusdiodeja käyttämällä saavutettiin noin 30 % suurempi teho. Ohitusdiodit voivat kuitenkin aiheuttaa häviöitä aurinkopaneelissa.

Alaluvussa 4.6 esitettyjen simulaatioiden avulla kontaktisormien peittämän pinta-alan ja kontaktisormien aiheuttaman resistanssin vaikutuksia tutkittiin kolmiliitosaurinkokennon oikosulkuvirtaan, oikosulkuvirrantiheyteen, avoimen piirin jännitteeseen, maksimitehoon, täytekertoimeen ja hyötysuhteeseen. Simuloitujen tulosten mukaan 3,2 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta peittävät kontaktisormet tuottivat 3,6 mW suuremman maksimitehon ja noin 0,4 % suuremman hyötysuhteen, kuin 5,6 % kolmiliitosaurinkokennon pinta-alasta peittävät kontaktisormet 25 °C lämpötilassa ja 960 kW/m² valon intensiteetillä. Jatkossa voitaisiin suorittaa uusia moniliitosaurinkokennomittauksia erisuuruisilla kontaktisormilla, jotta kontaktisormista aiheutuvaa sarjaresistanssin arvoa saataisiin tarkennettua. Mittausten avulla voitaisiin simuloida moniliitosaurinkokennoja erisuuruisilla kontaktisormilla ja määrittää minkä suuruisilla kontaktisormilla saavutetaan maksimihyötysuhde esimerkiksi valon intensiteetillä 1000 kW/m².

Alaluvussa 4.7 tutkittiin moniliitosaurinkokennojen epäideaalisesta käsittelystä tai valmistuksesta johtuvia oikosulkuja moniliitosaurinkokennon liitoksissa. Erisuuruisilla oikosuluilla havaittiin olevan merkittäviä vaikutuksia moniliitosaurinkokennon sähköiseen toimintaan. Kuvan 32 ja taulukon 12 tuloksista havaittiin, että kolmiliitosaurinkokennon päällimmäisessä liitoksessa oleva oikosulku pienensi kolmiliitosaurinkokennon hyötysuhdetta jopa 16 %. Kuvassa 33 esitetyn simulaation avulla huomattiin myös, että oikosulun vaikutus aurinkokennon hyötysuhteeseen ei ollut yhtä suuri 1000 kW/m² valon intensiteetillä kuin pienemmällä 100 kW/m² tai 10 kW/m² valon intensiteeteillä.

Diplomityössä tutkittiin myös kolmiliitosaurinkokennon epätasaisesta valon intensiteettijakaumasta. Aikaisemmin julkaistujen tutkimuksien perusteella todettiin, että valon intensiteetti voi olla erittäin suuri, jopa 10 000–20 000 kW/m², moniliitosaurinkokennon keskellä valoa keskittävän linssin johdosta [9, 13, 33]. Epätasaisella valon intensiteettijakamalla kolmiliitosaurinkokennon maksimiteho oli noin 7,4 mW pienempi ja hyötysuhde

lähes 1 % pienempi verrattuna kolmiliitosaurinkokennoon, jolla oli tasainen valon intensiteettijakauma. Epäideaalisesta optiikasta johtuvaa hyötysuhteen pientymistä voidaan minimoida käyttämällä laadukkaampia linssejä, mutta tällöin linseistä koituvat kustannukset voivat nousta [20, s. 88].

Simulaatiomallia voidaan kehittää jatkossa tarkemmaksi käyttämällä aurinkokennojen kaksiodiodimallia, mikä vaatisi kuitenkin tarkemmat arviot kolmiliitosaurinkokennojen rinnakkaisvastuksen resistanssista, sekä saturaatiovirtojen suuruudesta ja ideaalisuustekijöiden arvoista tyhjennysalueella ja kvasi-neutraaleilla alueilla. Aurinkokennojen kaksiodiodimallien käyttö saattaa monimutkaistaa simulaatioita niin, että useista aurinkokennoista koostuvien aurinkopaneelien simulaatiot ovat raskaita suorittaa. Yhden kaksiodiodimallia noudattavan aurinkokennon simulaatiot voisivat kuitenkin onnistua ilman suurempia ongelmia.

LÄHTEET

- [1] A. Aho, V.M. Korpjarvi, R. Isoaho, P. Malinen, A. Tukiainen, M. Honkanen, M. Guina, Determination of composition and energy gaps of GaInNAsSb layers grown by MBE, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 438, 2016, s. 49-54.
- [2] A. Aho, V. Polojarvi, V.M. Korpjarvi, J. Salmi, A. Tukiainen, P. Laukkanen, M. Guina, Composition dependent growth dynamics in molecular beam epitaxy of GaInNAs solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 124, 2014, s. 150-158.
- [3] A. Aho, Dilute Nitride Multijunction Solar Cells Grown by Molecular Beam Epitaxy, Tampere University of Technology. Publication 1343, 2015, 80 s. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:ISBN:978-952-15-3661-8>
- [4] A. Aho, R. Isoaho, A. Tukiainen, V. Polojärvi, T. Aho, M. Raappana, M. Guina, Temperature coefficients for GaInP/GaAs/GaInNAsSb solar cells, Vol. 1679, 2015.
- [5] A. Aho, A. Tukiainen, V. Polojärvi, M. Guina, Performance assessment of multijunction solar cells incorporating GaInNAsSb, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 9, Iss. 1, 2014, s. 1-7.
- [6] A. Aho, A. Tukiainen, V. Polojärvi, V. Korpjarvi, A. Gubanov, J. Salmi, M. Guina, P. Laukkanen, Lattice matched dilute nitride materials for III-V high-efficiency multi-junction solar cells: growth parameter optimization in molecular beam epitaxy, 2011.
- [7] A. Aho, A. Tukiainen, V. Polojärvi, J. Salmi, M. Guina, MBE Growth of High Current Dilute III-V-N Single and Triple Junction Solar Cells, 2012, s. 290-292.
- [8] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S.P. Nehra, M.S. Dhaka, A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature, *Energy Reports*, Vol. 1, 2015, s. 104-109.
- [9] I.R. Cole, R. Gottschalg, Optical modelling for concentrating photovoltaic systems: insolation transfer variations with solar source descriptions, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 9, Iss. 5, 2015, s. 412-419.
- [10] N. Das, H. Wongsodihardjo, S. Islam, Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency, *Renewable Energy*, Vol. 74, 2015, s. 917-924.
- [11] M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, A.W.H. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 50), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 25, Iss. 7, 2017, s. 668-676.

- [12] H. Häberlin, *Photovoltaics: system design and practice*, 1st ed., Wiley, Chichester, West Sussex, 2012, 742 s.
- [13] I. Cole, R. Gottschalg, *Modelling solar flux distribution for fresnel lens CPV systems*, *Photovoltaic Science Application and Technology Conference (PVSAT-7)*, April 6-8, 2011, The Solar Energy Society, Edinburgh, s. 1-6.
- [14] A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2nd ed., Wiley, Chichester; Hoboken, N.J, 2010, 1132 s.
- [15] M. Schmela, *Global market outlook for solar power / 2017–2020*, SolarPower Europe, Belgium, 2017, 18 s. Saatavissa: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/WEBINAR/Free_Solar-Power_Webinar__Global_Market_Outlook_2017-2021.pdf
- [16] M. Wiesenfarth, S.P. Philipps, A.W. Bett, K. Horowitz, S. Kurtz, *Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology*, Fraunhofer ISE, National Renewable Energy Laboratory, USA, 2017, 1-27 s. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/renewable-energy-data.html>
- [17] J.R. Mahmood, N.H. Selman, *Four MATLAB-Simulink models of photovoltaic system*, *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 7, Iss. 5, 2016, s. 417-426.
- [18] E.E. Michaelides, *Alternative Energy Sources*, 2012th ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, 459 s.
- [19] X.H. Nguyen, M.P. Nguyen, *Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink*, *Environmental Systems Research*, Vol. 4, Iss. 1, 2015, s. 1-13.
- [20] P. Pérez-Higueras, E.F. Fernández, *High Concentrator Photovoltaics: Fundamentals*, *Engineering and Power Plants*, 1st ed., Springer, Cham, 2015, 480 s.
- [21] H. Rezk, E. Hasaneen, *A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems*, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, Iss. 3, 2015, s. 873-881.
- [22] S. Kurtz, G. Wilson, M. Werner, *NREL Research solar cell efficiency records*, National renewable energy laboratory, Golden, Co. USA, Saatavissa: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>
- [23] S. Philipps, W. Warmuth, *Photovoltaics Report*, Fraunhofer ISE, Germany, 2017, 44 s. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- [24] *Simulink Simscape documentation*, Mathworks, verkkosivu Saatavissa (viitattu 18.12.2017): <https://se.mathworks.com/help/physmod/simscape/>

- [25] Simulink Solar cell documentation, Mathworks, verkkosivu Saatavissa (viitattu 17.12.2017): <https://se.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/solarcell.html>
- [26] Simulink Solver configuration documentation, Mathworks, verkkosivu Saatavissa (viitattu 18.12.2017):
<https://se.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/solverconfiguration.html>
- [27] Solar Simulator (TSS) datasheet, OAI Trisol, USA, 4 s. Saatavissa:
http://www.cwitechsales.com/OAI_TSS_DataSheet.pdf
- [28] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefert, M. Wiesenfarth, A.W. Bett, FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 23, Iss. 10, 2015, s. 1323-1329.
- [29] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoudi, MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell, *International journal of renewable energy research*, Vol. 2, Iss. 2, 2012, <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/157>
- [30] Trisol CPV Solar Simulators, OAI Trisol, USA, 4 s. Saatavissa: <http://www.oa-inet.com/pdf/CPV-web-versionV2.pdf>
- [31] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, Iss. 5, 2009, s. 1198-1208.
- [32] J.F. Wheeldon, C.E. Valdivia, A.W. Walker, G. Kolhatkar, A. Jaouad, A. Turala, B. Riel, D. Masson, N. Puetz, S. Fafard, R. Arès, V. Aimez, T.J. Hall, K. Hinzer, Performance comparison of AlGaAs, GaAs and InGaP tunnel junctions for concentrated multijunction solar cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 19, Iss. 4, 2011, s. 442-452.
- [33] N. Yamada, K. Okamoto, Experimental measurements of a prototype high concentration Fresnel lens CPV module for the harvesting of diffuse solar radiation, *Optics express*, Vol. 22 Suppl. 1, Iss. S1, 2014, s. A34.