



AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN OPETUSKÄYTTÖÖN

Mikko Rytökari

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015
Sähkötekniikan ko.
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

RYTÖKARI, MIKKO:

Aurinkosähköjärjestelmän kehittäminen opetuskäyttöön

Opinnäytetyö 78 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Toukokuu 2015

Uusiutuvan energian kysyntä on kasvanut tasaisesti niin Suomessa kuin maailmanlaajuisestikin. Uusiutuvien energiamuotojen käytön yleistyessä Tampereen ammattikorkeakoulu pyrkii lisäämään uusiutuvia energiamuotoja koskevaa koulutusta. Aurinkoenergiaan liittyvä koulutus on tärkeää erityisesti sähkövoimatekniikan ja sähköisen talotekniikan erikoistumisvaihtoehdoissa. Lisäksi tällaiselle koulutustarjonnalle on todennäköisesti kysyntää alan yrityksissä ja aurinkopaneelijärjestelmän hankkivien kuluttajien keskuudessa.

Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon rakennetun Greenlab-mittausympäristön aurinkopaneelijärjestelmän käyttöä sähkötekniikan opetuksessa. Työssä suunniteltiin laboratorioympäristössä toteutettavia mittausharjoituksia, joiden avulla voidaan havainnollistaa aurinkopaneelien toimintaperiaatetta ja ominaisuuksia. Työn tavoitteena oli simuloida erilaisia olosuhdemuutoksia, jotka vaikuttavat aurinkopaneelin virta-jännite-käyrään ja maksimitehopisteeseen. Lisäksi työssä kehitettiin tutkimusmenetelmiä järjestelmän akuston lataussäätimen ja invertterin toiminnan havainnollistamiseksi. Lopputuloksena oli tarkoitus saada pohja laboratoriossa tulevaisuudessa suoritettaville mittausharjoituksille.

Laboratoriossa tehtyjen mittausten tulokset olivat pääosin yhtenevät aiheeseen liittyvän teorian kanssa. Mittaustulokset olivat kuitenkin epätarkkoja käytössä olleiden resurssien vuoksi. Tulokset osoittivat, että mittausten menetelmät ovat toimivia, mutta laitteistossa on vielä kehitettävää. Mittaustulosten perusteella voitiin kuitenkin luoda alustava pohja tuleville laboratoriomittausharjoituksille.

Mittausten menetelmien osalta tavoite saavutettiin, ja työn yhteydessä syntyi uusia ehdotuksia mittausten ympäristön ja siten mittausharjoitusten kehittämiseksi. Käytössä olleita laitteita tulisi kehittää tai korvata mittaustulosten parantamiseksi. Käytössä olleiden valaisimien tuottama säteilyintensiteetti osoittautui odotettua vähäisemmäksi, ja paneelien lämpötilan vaihtelun toteuttaminen oli vaikeaa. Soveltuvan säätövastuksen puuttuessa jouduttiin käyttämään vastuslaitteistoja ja laitteistoon olisi syytä tehdä joitakin kytkentämuutoksia mittausten helpottamiseksi. Työssä esitettiin ehdotukset havaittujen puutteiden korjaamiseksi. Näillä muutoksilla voitaisiin luoda paremmat edellytykset ilmiöitä havainnollistaville mittaustuloksille.

Asiasanat: aurinkoenergia, aurinkokennot, simulointi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

RYTÖKARI, MIKKO:
Developing Solar Power System for Teaching

Bachelor's thesis 78 pages, appendices 5 pages
May 2015

The demand for renewable energy has constantly grown both in Finland and globally. As the use of renewable energy increases, Tampere University of Applied Sciences strives to add education related to renewable energy sources. Education related to solar energy is important especially in the options of electrical power engineering and electrical building services. Furthermore, there is probably a demand for this kind of education in companies of this trade and even among consumers purchasing solar panel systems.

The purpose of this thesis was to study the use of Greenlab's solar panel system in teaching of electrical engineering. Greenlab is a measurement environment built in the electrical laboratory of Tampere University of Applied Sciences. Exercises to be performed in laboratory conditions were designed to illustrate the operational principles and characteristics of solar panels. The objective was to simulate different changes in ambient conditions influencing the current-voltage curve and maximum power point of solar panels. Also research methods to illustrate the operation of charge controller and inverter were developed. The object was to create a tentative base for future measurement exercises in the laboratory.

The results of measurements were mainly consistent with theory related to the subject. The results were nevertheless inaccurate because of the resources used. The results proved that measuring methods work, but there is still room for improvement with the equipment. A base for the future laboratory measurement exercises could be created, based on the results.

The objective was reached in terms of measuring methods and propositions to improve the equipment and therefore the exercise, developed during the work. Some of the used equipment should be improved or replaced to improve the measurement results. The radiation intensity of the luminaires proved to be weaker than expected and variation of temperature was hard to execute. In the lack of a suitable adjustable resistor, fixed resistor equipment had to be used and some changes to connections should be made to simplify the measurements. Proposals to fix the detected defects were presented in this thesis. Better conditions to illustrative measurement results could be created with these modifications.

Key words: solar power, solar cells, simulation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	AURINKOPANEELIT.....	7
2.1	Puolijohdeaurinkokennon toimintaperiaate	7
2.2	Aurinkopaneelityypit.....	8
2.3	Aurinkopaneelin virta-jännite-käyrä	9
2.4	Aurinkokennon teho.....	11
2.5	Aurinkokennojen standardimittausolosuhteet	12
2.6	Lämpötilan vaikutus aurinkokennon ominaisuuksiin	13
2.7	Säteilyintensiteetin vaikutus aurinkokennon ominaisuuksiin.....	14
2.8	Osavarjostustilanteiden vaikutus aurinkopaneelin ominaisuuksiin	15
2.9	Aurinkokennon ohjainlaitteet	16
2.9.1	Lataussäädin	17
2.9.2	Invertteri.....	17
3	MITTAUSLAITTEISTO.....	19
3.1	Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorio.....	19
3.2	Greenlab	19
3.3	Greenlab-aurinkopaneelijärjestelmä	19
3.3.1	Aurinkopaneelit	20
3.3.2	Lataussäädin	23
3.3.3	Akusto	24
3.3.4	Invertteri.....	25
3.3.5	Suojauskeskus.....	26
3.3.6	Valaisimet	27
3.3.7	Mittauslaitteet ja -välineet.....	29
4	MITTAUKSET	32
4.1	Virta-Jännite-käyrä kohtisuorassa valaistuksessa	32
4.2	Säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään.....	35
4.3	Lämpötilan vaikutus virta-jännite-käyrään.....	42
4.4	Säteilyn tulokulman vaikutus virta-jännite-käyrään	48
4.5	Osittaisen varjostuksen vaikutus virta-jännite-käyrään.....	51
4.6	Virta-jännite-käyrä loisteputkivalaistuksessa	57
4.7	Lataussäätimen teho ja hyötysuhde.....	59
4.8	Invertterin ominaisuudet.....	65
5	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN.....	68
5.1	Valaisimet.....	68
5.2	Paneelien kuormittaminen vastuksella ja maksimitehopisteen määrittäminen	69

5.3	Virran mittaus lataussäätimen tutkimisessa.....	70
5.4	Akuston lataaminen.....	70
5.5	Paneelien lämmitys ja lämpötilan mittaus	70
6	POHDINTA	71
	LÄHTEET	73
	LIITTEET.....	74
	Liite 1. Työohje.....	74

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ja talouden kehityksen myötä uusiutuvan energian kysyntä on kasvanut tasaisesti niin Suomessa kuin maailmanlaajuisestikin. Uusiutuvista energiamuodoista maailmanlaajuisesti vuosina 2001 - 2010 aurinkosähkön tuotanto kasvoi eniten. (Hieta-lahti, 2013, 74)

Aurinkosähköjärjestelmien ja niiden komponenttien hinnat ovat olleet viime vuosina laskussa, kun vastaavasti sähkön hinnan kehitys on ollut nousussa. Kun lisäksi aurinkosähköjärjestelmien hyötysuhde teknologian jatkuvan kehityksen myötä paranee, niiden takaisinmaksuaika lyhenee. Toisaalta aurinkosähkön yleistymistä saattaa rajoittaa investointien lykkääminen, koska aurinkosähköjärjestelmän rakentaminen on todennäköisesti seuraavana vuonna nykyistä kannattavampaa.

Uusiutuvien energiamuotojen käytön yleistyessä Tampereen ammattikorkeakoulu pyrkii vastaamaan kysyntään ja lisäämään uusiutuvia energiamuotoja koskevaa koulutusta. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon rakennetun Greenlab -mittausympäristön aurinkopaneelijärjestelmän käyttöä sähkötekniikan opetuksessa. Työssä suunniteltiin laboratorioympäristössä toteutettavia mittausharjoituksia, joiden avulla voidaan havainnollistaa aurinkopaneelien toimintaperiaatetta ja ominaisuuksia. Suunnitellut mittaukset toteutettiin ja tuloksien pohjalta tarkasteltiin, millaisia mittauksia laboratoriossa voidaan suorittaa.

Työn tavoitteena oli simuloida erilaisia olosuhdemuutoksia, jotka vaikuttavat aurinkopaneelin virta-jännite-käyrään ja maksimitehopisteeseen. Lisäksi työssä kehitettiin tutkimusmenetelmiä järjestelmän muiden komponenttien toiminnan havainnollistamiseksi. Lopputuloksena oli tarkoitus saada pohja laboratoriossa tulevaisuudessa suoritettaville mittausharjoituksille ja luonnos laboratoriomittauksen työohjeesta.

Työn toisessa luvussa käsitellään aurinkopaneelien toimintaa eri olosuhteissa teorian tasolla ja kolmannessa luvussa esitellään työkohdetta ja sen eri osia. Neljäs luku käsittelee laboratoriossa suoritettuja mittauksia ja niiden tuloksia. Viidennessä luvussa on esitetty mittausten yhteydessä havaittuja kehityskohteita ja ehdotuksia järjestelmän kehittämiseksi.

2 AURINKOPANEELIT

2.1 Puolijohdeaurinkokennon toimintaperiaate

Puolijohdeaurinkokennon toiminnan taustalla on ns. valosähköinen ilmiö. Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan valolle altistetussa kappaleessa tapahtuvia sähköisiä muutoksia. Pohjimmillaan kyse on sähkömagneettisen säteilyn ja sähkövarausten välisestä vuorovaikutuksesta. Aineen elektronit voivat saada sähkömagneettisesta säteilystä riittävästi energiaa irtautuakseen atomiytimen vetovoimasta. Valo etenee valokvantteina eli fotoneina. (Korpela, 2014)

P- ja N-tyyppin puolijohdekappaleiden liittäminen toisiinsa muodostaa PN-liitoksen, jossa kappaleiden rajapinnalla tapahtuu rekombinaatioksi kutsuttu ilmiö. Siinä vapaa elektroni joutuu atomiytimen sieppaamaksi ja jää sitä kiertävälle radalle. N-tyyppin piin vapaat elektronit täyttävät P-tyyppin piikappaleen elektroniaukkoja. Tämän seurauksena PN-liitoksen rajapinnan läheisyydessä muodostuu ns. tyhjennysalue, joka on täysin tyhjä vapaista varauksenkuljettajista. Tyhjennysalueen P-puolelle muodostuu negatiivinen nettovaraus N-puolelta siirtyneiden elektronien ansiosta. Toisaalta N-puolelle muodostuu sieltä poistuneiden elektronien vuoksi positiivinen nettovaraus. Tyhjennysalueelle muodostuu täten sähkökenttä. Koska sähkökentän suunta on määritetty positiivisemmasta varauksesta kohti negatiivisempaa, PN-liitoksen sähkökentän suunta on siten N-puolelta P-puolelle. P-puolelle syntyvä negatiivinen nettovaraus hylkii N-puolen vapaita elektroneja, jolloin muodostuu rekombinaatiota vastustava voima. Tyhjennysalueen leveys määrittyy siten vastakkaissuuntaisten voimien tasapainotilanteen perusteella. Tyhjennysalueen leveys kasvaa niin pitkään, kun rekombinaatiota ylläpitävä voima on suurempi. (Korpela, 2014)

Puolijohdeaurinkokennon suunnittelussa pyritään siihen, että suurin osa auringon säteilystä absorboituu PN-liitoksen tyhjennysalueella. Tyhjennysalueen sähkökenttä erottelee tällöin fotonien synnyttämät elektronit ja aukot tehokkaimmalla tavalla, jolloin rekombinaatio vähenee ja kennon hyötysuhde paranee. Fotonin absorboituessa tyhjennysalueen P-puolella, ideaalitalanteessa sähkökenttä siirtää syntyneen johtavuuselektronin N-puolelle ja vastaavasti aukon P-puolelle, koska aukkoa voidaan mallintaa positiivisena varauksena. Myös N-puolella absorboitunut fotoni synnyttää johtavuuselektronin, jonka

tyhjennysalueen sähkökenttä siirtää N-puolelle ja aukon P-puolelle. Fotonin absorptio tyhjennysalueella johtaa elektronien liikkeeseen kohti N-puolta joka tapauksessa, riippumatta siitä, kummalla puolella PN-liitosta absorptio tapahtuu. (Korpela, 2014)

2.2 Aurinkopaneelityypit

Tyypillisin aurinkokennojen valmistusmateriaali on pii, jota käytetään amorfisena, yksitai monikiteisenä. Amorfisen piikennon valmistus on edullisempaa ja kennomateriaali on taipuisaa. Haittapuolena on kiteisiä kennoja huonompi hyötysuhde, noin 6 - 8 %. Amorfista piitä voidaan käyttää ohutkalvopaneeleissa. (Hietalahti, 2013, 74)

Yksikiteinen piikkenno sahataan profiililtaan pyöreästä piiaihiosta. Kalliin materiaalin vuoksi aihioita ei leikata nelikulmaisiksi, ja yksikiteisen piikennon tunnistaakin sen kulmissa olevista aukoista. Yksikiteisen piin atomit ovat tietyssä järjestyksessä, joten sen valmistus vaatii erityistä tarkkuutta johtaen korkeampiin valmistuskustannuksiin. (Nikkilä, Paavola, Pöyhönen, 2007)

Monikiteisen aihion raaka-aine voidaan hyödyntää paremmin ja leikata nelikulmaisia kennoja. Monikiteiset aihiot valmistetaan valamalla, eikä prosessi vaadi samanlaista tarkkuutta, kuin yksikiteisen aihion valmistus. Siten sen valmistuskustannukset ovat alhaisemmat, jolloin hieman huonommasta hyötysuhteesta huolimatta monikiteisten aurinkokennojen valmistuksesta on tullut kannattavampaa. (Nikkilä ym, 2007)

Aurinkopaneelien kehitystyö on johtanut myös vaihtoehtoisten materiaalien käyttöön ja ns. ohutkalvotekniikkaan. Puolijohdeaurinkopaneelien valmistuskustannuksista suurimman osan muodostaa materiaalina käytetty pii. Tästä syystä kehityksessä yksi suunta on valmistuskustannuksien minimointi uusilla, edullisemmilla materiaaleilla. Toisaalta piikkennojen hyötysuhdetta pyritään parantamaan. Molempien kehityssuuntien tavoitteena on laskea aurinkoenergialla tuotetun watin hinta mahdollisimman alhaiseksi.

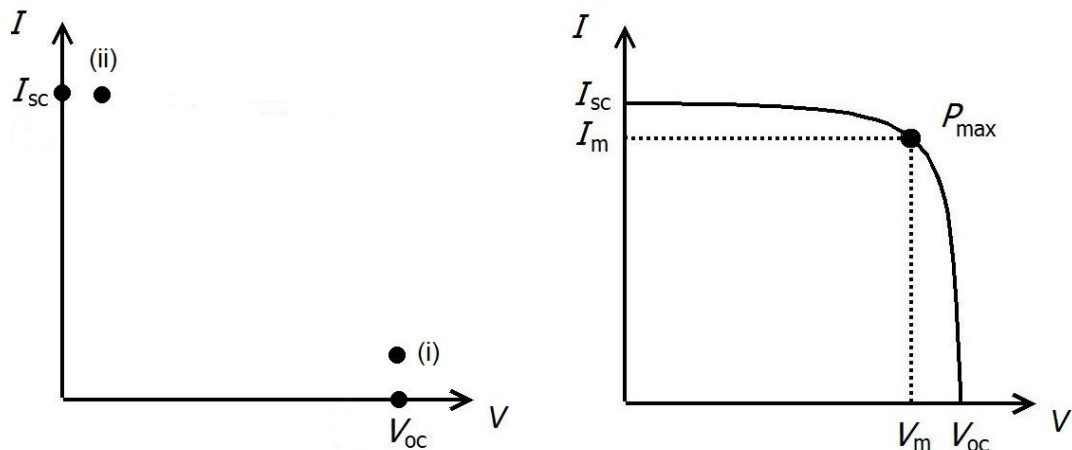
2.3 Aurinkopaneelin virta-jännite-käyrä

Puolijohdeaurinkokennon toiminnan kannalta kolme tärkeää toimintapistettä ovat tyhjäkäynti, oikosulku ja maksimitehopiste. Tyhjäkäynnissä aurinkokennon navat ovat irti toisistaan, jolloin niiden välinen resistanssi lähestyy ääretöntä. Tällöin napojen välinen virta on nolla ampeeria ja siten myös teho on nolla wattia. Valolle altistetussa aurinkokennossa tyhjennysalueeseen syntyy vapaita varauksenkuljettajia, jolloin sähkökenttä erottelee johtavuuselektronit N-puolelle ja aukot P-puolelle. P-puolen navan potentiaalista tulee positiivisempi, jolloin napojen välille muodostuu jännite. (Korpela, 2014)

Tyhjennysalueen sähkökentän heikkeneminen rajoittaa jännitteen nousua. Kun tyhjennysalueen sähkökentän erottelemien varauksenkuljettajien määrä kasvaa, sähkökenttä heikkenee. N-puolelle kertyneet elektronit kumoavat tyhjennysalueen N-puolen positiivista varausta, mikä aiheuttaa sähkökentän heikkenemistä ja samalla tyhjennysalueen kyky erotella fotonien synnyttämiä varauksia heikkenee. Kun sähkökentän voimakkuus ei enää riitä uusien elektronien siirtämiseksi PN-liitoksen N-puolelle, saavutetaan kennon maksimijännite, jota kutsutaan tyhjäkäyntijännitteeksi U_{oc} . (Korpela, 2014)

Oikosulkutilanteessa kennon navat on kytketty toisiinsa, jolloin niiden välinen resistanssi lähestyy nollaa ohmia. Navat ovat samassa potentiaalissa, joten jännite on nolla voltia ja siten myös teho on nolla wattia. Kun kennon navat oikosuljetaan, niiden välinen jännite purkautuu ja johtimessa kulkee virtaa. Tyhjennysalueen sähkökenttää tyhjäkäynnissä heikentäneet N-puolen elektronit kulkevat vastuksetta ulkoista johdinta pitkin kennon P-puolelle ja rekombinoituvat fotonien absorptioon synnyttämiin aukkoihin. Siten tyhjennysalueen sähkökentän voimakkuus palautuu suunnilleen alkuperäiseen suuruuteensa. Ideaalutilanteessa ulkoinen piiri on vastukseton, jolloin syntyy tietyissä olosuhteissa kennon suurin mahdollinen virta, oikosulkuvirta I_{sc} . Elektronien suunta on N-puolelta P-puolelle, joten johtimen virran suunta on päinvastainen. (Korpela, 2014)

Kun kennon napojen välille kytketään kuormaa, virta-jännite-käyrälle muodostuu toimintapiste, jossa piiri saavuttaa tietyn tasapainotilanteen, joka määrittää piirin jännitteen ja virran. Yksinkertaisesti tätä ominaiskäyrää havainnollistetaan vastuksella. Kun vastuksen resistanssia muutetaan, syntyy toimintapisteitä, joissa virran ja jännitteen suuruus määrittyy kennon ominaiskäyrän mukaisesti. Aurinkokennon virta-jännitekäyrä on tyypillisesti muodoltaan kuvion 1 mukainen.

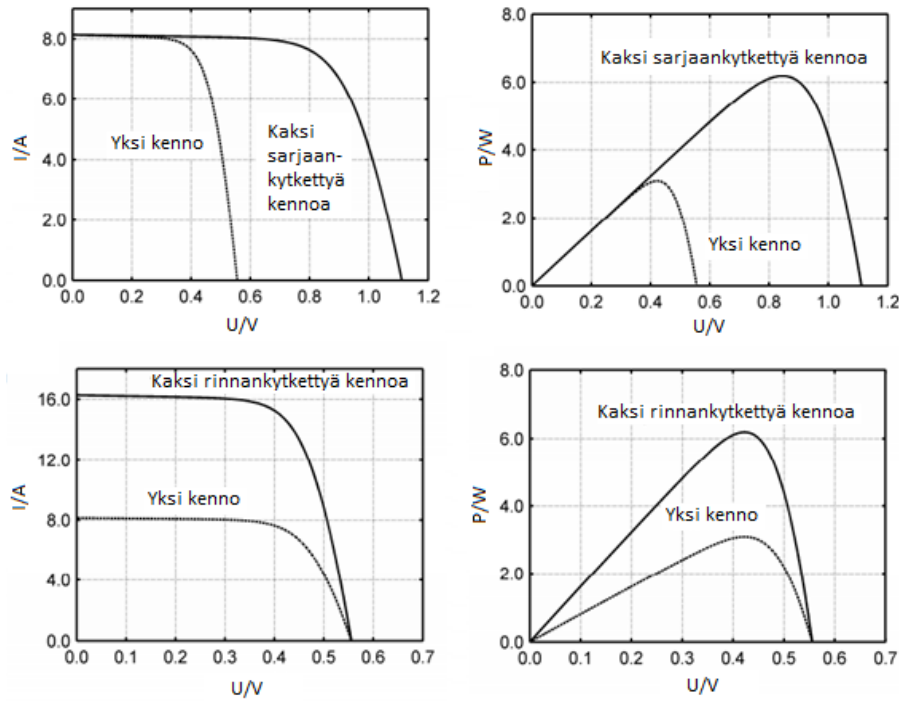


KUVIO 1. Virta-jännite-käyrän muodostuminen (Korpela, 2014)

Käyrä muodostuu tyhjäkäynti- ja oikosulkupisteiden välille. Jokainen käyrän piste vastaa tasapainotilaa jännitteen ja virran välillä. Tyhjäkäynnillä resistanssi on suurimmillaan ja lähestyy ääretöntä. Kun varausten kertyminen on varausten purkautumista suurempaa, jännite laskee vähäisesti. Kuvassa tämä näkyy käyrän lähes pystysuorana osana. Resistanssin pienentyessä tiettyyn pisteeseen, varausten purkautuminen ulkoista piiriä pitkin kiihtyy voimakkaasti. Kun resistanssi tästä vielä laskee, jännite putoaa voimakkaasti ja virta kasvaa vain vähäisesti, kunnes saavutetaan oikosulkupiste. Tämä näkyy käyrän lähes vaakasuorana osana. (Korpela, 2014)

Maksimitehopiste on se toimintapiste, jossa kennon jännitteen ja virran tulo on suurimmillaan. Maksimitehopisteessä kertyvien ja purkautuvien varausten suhde kääntyy. Graafisesti esitettyinä pisteeseen piirretty suorakulmio on pinta-alaltaan suurimmillaan. Tyhjäkäynnin ja maksimitehopisteen välillä aurinkokenno käyttäytyy lähes jännitelähteen tavoin, koska resistanssin muutos ei juuri vaikuta jännitteeseen. Toisaalta maksimitehopisteen ja oikosulun välillä kenno käyttäytyy lähes virtalähteen tavoin, koska resistanssin muutos vaikuttaa vain vähäisesti virtaan. (Korpela, 2014)

Aurinkopaneelien sarjaan- ja rinnankytkennät vaikuttavat virta-jännitekäyrään eri tavoin: Kuviossa 2 on esitetty kytkennän vaikutukset paneelien ominaisuuksiin.



KUVIO 2. Aurinkopaneelien sarjaan- ja rinnankytkennän vaikutus niiden ominaiskäyriin (Mäki, 2011, muokattu)

Kun kaksi ominaisuuksiltaan identtistä aurinkopaneelia kytketään sarjaan, tyhjäkäyntijännite ja maksimiteho kaksinkertaistuvat. Maksimitehopisteen jännite kaksinkertaistuu sarjaankytkennässä. Rinnankytkennässä oikosulkuvirta, maksimiteho ja maksimitehopisteen virta kaksinkertaistuvat.

2.4 Aurinkokennon teho

Tasajännitepiirin sähköteho muodostuu virran ja jännitteen tulona. Aurinkokennon maksimiteho lasketaan yleensä maksimi- eli tyhjäkäyntijännitteen ja maksimi- eli oikosulkuvirran avulla. Koska niiden arvot saavutetaan täysin vastakkaisissa toimintapisteissä, käytetään laskukaavassa ns. täytekertointa f_p . Täytekertoimen arvo on tyypillisesti noin 0,7-0,8 (Korpela, 2014). Näinollen aurinkokennon maksimitehon yhtälö voidaan lausua muodossa

$$P_{\max} = f_p U_{oc} I_{sc} \quad (1)$$

, jossa P_{\max} on aurinkokennon maksimiteho, f_p on kennon täytekerroin, U_{oc} on kennon tyhjäkäyntijännite ja I_{sc} on kennon oikosulkuvirta.

Aurinkokennon maksimitehopiste, kuten sen koko virta-jännite-käyräkin, riippuu merkittävästi vallitsevista olosuhteista. Lämpötila ja säteilyintensiteetti vaikuttavat kennon sähköisiin ominaisuuksiin luvuissa 2.6 ja 2.7 esitetyillä tavoilla. Aurinkokennoille ilmoitetut suoritusarvot on yleensä saavutettu standardimittausolosuhteissa, jollaiset harvoin saavutetaan kennojen käyttöpaikassa. Standardimittausolosuhteet on esitetty luvussa 2.5.

Puolijohdeaurinkokennojen hyötysuhde on verrattain alhainen, parhaimmillaan piiaurinkokennon hyötysuhde on noin 15 %. Hyötysuhdetta eniten alentaa fotonien energian muuttuminen lämmöksi. Osa säteilystä heijastuu kennon pinnasta ja osalla fotoneista ei ole riittävästi energiaa elektronien irrottamiseksi atomiytimen vetovoimasta. Myös puolijohteen sähköenergiasta osa muuttuu lämmöksi ja kennossa tapahtuva rekombinaatio alentaa hyötysuhdetta (Korpela, 2014). Hyötysuhde on kennon tuottaman sähkötehon ja siihen saapuvan säteilytehon suhde, jonka maksimiarvo voidaan laskea yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{säteily}}} = \frac{f_p U_1 I_{sc}}{GA} \quad (2)$$

, jossa η on aurinkokennon hyötysuhde, P_{\max} on kennon maksimisähköteho, $P_{\text{säteily}}$ on kennolle tuleva säteilyteho, f_p on kennon täytekerroin, U_{oc} on kennon tyhjäkäyntijännite, I_{sc} on kennon oikosulkuvirta, G on säteilyintensiteetti ja A on kennon pinta-ala.

2.5 Aurinkokennojen standardimittausolosuhteet

Jotta aurinkokennoille voidaan määrittää vertailukelpoiset kilpiarvot, ne pitää testata standardoiduissa olosuhteissa. Kennon ominaisuuksiin vaikuttavat olennaisesti säteilyintensiteetti, ilmamassa ja lämpötila. STC-olosuhteissa (Standard Test Conditions) kennon lämpötila $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, säteilyintensiteetti $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ja ilmamassa $AM = 1,5$. Sätei-

lyintensiteetillä tarkoitetaan säteilytehoa pinta-alayksikköä kohti ja ilmassalla tarkoitetaan säteilyn ilmakehässä kulkeman matkan ja ilmakehän paksuuden suhdetta. Ilmakehän ylärajalla ilmassa on nolla. Ilmassa vaikuttaa säteilyn aallonpituusjakaumaan.

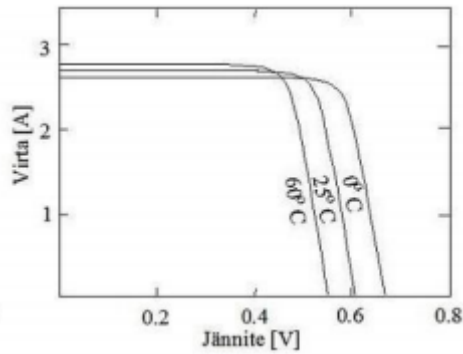
Standardimittauksissa käytetty lämpötila on todellisiin olosuhteisiin nähden ristiriitainen, sillä auringon säteily nostaa aurinkokennon lämpötilaa merkittävästi suuremmaksi. Vaikka ympäristön lämpötila olisi 25 °C, saattaa aurinkopaneelin lämpötila nousta yli 50 °C:een auringonpaisteessa. (Suntekno Oy)

2.6 Lämpötilan vaikutus aurinkokennon ominaisuuksiin

Maapallon pinnalla lämpötila vaihtelee vuodenajasta ja sijainnista riippuen merkittävästi. Alin WMO:n (World Meteorological Organization) hyväksymä mitattu lämpötila saavutettiin Antarktiksella 1983, jolloin lämpötila oli -89 °C ja korkein mitattu lämpötila 56,7 °C saavutettiin Kaliforniassa vuonna 1913. (WMO). Suomessa lämpötila saattaa vuosittain vaihdella 50 – 60 °C.

Piiaurinkokennon aineen elektronien energia kasvaa ja ionisaatioenergia laskee lämpötilan noustessa. Kiderakenteen sidoselektronit vapautuvat siten helpommin. PN-liitoksen P-puolelle virittyy johtavuuselektroneja, jotka siirtyvät tyhjennysalueen sähkökentän voimasta N-puolelle. Samalla pidempiaaltainen sähkömagneettinen säteily aiheuttaa valosähköisen ilmiön puolijohteessa. Seurauksena elektronien liike PN-liitoksen yli lisääntyy ja oikosulkuvirta kasvaa lievästi. (Korpela, 2014)

Lämpötilan nousun P-puolelle synnyttämät johtavuuselektronit ja N-puolelle synnyttämät aukot erottuvat sähkökentän voimasta, jonka seurauksena sähkökenttä heikkenee. Tämä johtaa sähkökentän elektronien erottelukyvyn heikkenemiseen ja samalla tyhjäkäyntijännitteen lievään alenemiseen. Kuviossa 3 on esitetty lämpötilan vaikutus kennon virta-jännite-käyrään. (Korpela, 2014)



KUVIO 3. Lämpötilan vaikutus virta-jännite-käyrään (Korpela, 2014, muokattu)

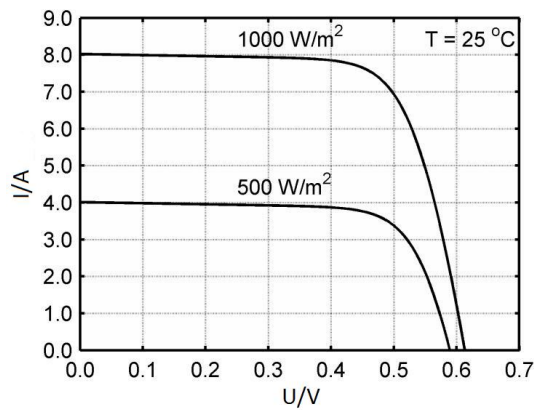
2.7 Säteilyintensiteetin vaikutus aurinkokennon ominaisuuksiin

Maapallon pinnalla säteilyintensiteetti on tyypillisesti välillä 0...1000 W/m². Aurinkokennon toiminta on erityisen riippuvainen säteilyintensiteetistä, koska se vaikuttaa absorboituvien fotonien määrään (Korpela, 2014). Fotonien lukumäärä pinta-alayksikköä kohti aikayksikössä on suoraan verrannollinen tiettyä aallonpituutta vastaavaan säteilyintensiteettiin. Säteilyintensiteetti on likimain suoraan verrannollinen oikosulkuvirran suuruuteen. Säteilyintensiteetin vaikutus oikosulkuvirran suuruuteen voidaan laskea yhtälöllä

$$\frac{G}{G_{\text{STC}}} = \frac{I_{\text{sc}}}{I_{\text{sc(STC)}}} \quad (3)$$

, jossa G on kennoon kohdistuva säteilyintensiteetti, G_{STC} on standardimittausolosuhteiden säteilyintensiteetti ($G = 1000 \text{ W/m}^2$), I_{sc} on kennon oikosulkuvirta ja $I_{\text{sc(STC)}}$ on standardimittausolosuhteissa mitattu kennon oikosulkuvirta.

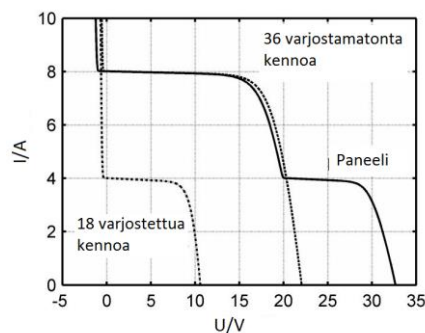
Tyhjäkäyntitilanteessa sähkökenttä heikentyy joka tapauksessa minimiinsä, eikä säteilyintensiteetillä ole merkittävää vaikutusta tyhjäkäyntijännitteeseen (Korpela, 2014). Kuviossa 4 on esitetty säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään.



KUVIO 4. Säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään (Mäki, 2011)

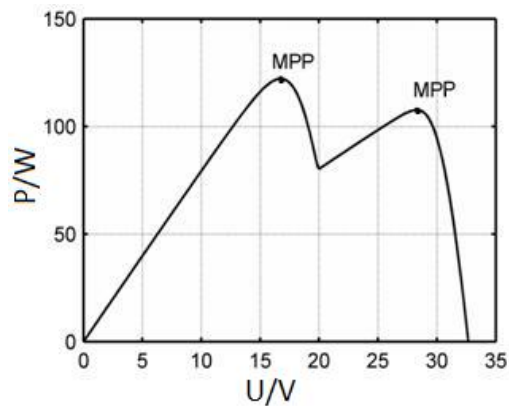
2.8 Osavarjostustilanteiden vaikutus aurinkopaneelin ominaisuuksiin

Pienelläkin varjolla saattaa olla suuri vaikutus paneelien tehon tuottoon. Sarjaan kytkettyjen paneelien käyttöjännite määräytyy heikoimman tuoton mukaan (Vatajankosken sähkö). Tässä tapauksessa paneelit oli kytketty rinnan. Rinnankytkennässä yhden paneelin varjostus ei haittaa muiden paneelien toimintaa. (OAMK, 2014). Jos aurinkopaneelin kennoista yksi varjostuu, sen yli vaikuttaa negatiivinen jännite. Tällöin kenno kuluttaa muiden kennojen tuottamaa tehoa. Pahimmassa tapauksessa varjostettu kenno kuluttaa kokonaan muiden kennojen tuottaman tehon, jonka kasvaessa liian suureksi kenno saattaa tuhoutua. Ilmiön ehkäisemiseksi paneeleihin kytketään ohitusdiodeja vastarinnan kennojen kanssa. Ohitusdioidien käyttö vaikuttaa aurinkopaneelien toimintaan osavarjostustilanteissa (Mäki, 2011, 2014). Kuvioista 5 nähdään, että osittain varjostetun paneelin varjostettuun osaan muodostuu toinen virta-jännite-käyrä, joka summautuu varjostamattoman osan virta-jännite-käyrään.



KUVIO 5. Aurinkopaneelin virta-jännite-käyrä, kun 18 kennoa 56:sta on varjostunut (Mäki, 2011, muokattu)

Tällöin käyrään muodostuu kaksi paikallista maksimitehopistettä. Siten lataussäädin saattaa erehtyä maksimitehopisteestä ja toimia todellista maksimia alhaisemmalla teholla. Kuviossa 6 on esitetty kahden maksimitehopisteen muodostuminen tehon kuvaajassa.



KUVIO 6. Kahden paikallisen maksimitehopisteen muodostuminen (Mäki, 2011, muokattu)

Ilmiön seurauksena lataussäädin saattaa erehtyä toimimaan alemmassa paikallisessa maksimitehopisteessä, jolloin järjestelmän hyötysuhde heikkenee.

2.9 Aurinkokennon ohjainlaitteet

Koska aurinkokennon ominaisuudet riippuvat olosuhteista, maksimitehopisteen hyödyntäminen vaatii eri tilanteissa erilaista kuormitusta. Kun kuormaa mallinnetaan vastuksella, jonka resistanssi ei muutu, kennon maksimiteho voidaan hyödyntää vain tietynlaisissa olosuhteissa. Kennon ja kuormalaitteen väliin voidaan lisätä muuntaja, jonka muuntosuhdetta muutetaan niin, että kulloinkin vallitsevien olosuhteiden mukainen maksimitehopiste kennossa saavutetaan. Tällöin samalla kuormalla voidaan kuormittaa kennoa maksimitehopisteessä kaikissa olosuhteissa. Aurinkokennon tehokkaan käytön takaamiseksi säädettävältä muuntajalta tarvitaan nopeaa reagointia olosuhdemuutoksiin.

2.9.1 Lataussäädin

Tehoelektronikan keinoin voidaan luoda tehokkaita säätölaitteita, joilla aurinkokennon energia saadaan hyödynnettyä parhaalla mahdollisella tavalla kaikissa olosuhteissa. Kun sähköverkkoon liittyminen ei ole järkevää, aurinkopaneelijärjestelmän energia kerätään akustoon. Markkinoilla on tähän tarkoitukseen sopivia älykkäitä lataussäätimiä. MPPT-tekniikalla (Maximum power point tracking) analysoidaan kennosta ulos tulevaa jännitettä ja virtaa, jotka laite muuntaa akuston tehokkaaseen lataamiseen sopivaksi virraksi ja jännitteeksi. Säädin muuttaa paneelin kuormitusta löytääkseen pisteen, jossa sen teho on suurimmillaan. Ideaalitulanteessa säätimen hyötysuhde on 100 %, jolloin lataussäätimen ulostuloteho on yhtä suuri kuin paneeleilta saatava teho. Siten lataussäätimen toiminta noudattaa yhtälöä 4.

$$U_{in} \cdot I_{in} = U_{out} \cdot I_{out} \cdot \eta \quad (4)$$

, jossa U_{in} on aurinkopaneelin jännite, I_{in} on paneelin virta, U_{out} on säätimen latausjännite, I_{out} on säätimen latausvirta ja η on lataussäätimen hyötysuhde

Aurinkopaneeli määrittää sisään tulevan virran ja jännitteen, akusto määrittää latausjännitteen ja lataussäädin maksimoi akuston latausvirran yhtälön 4 mukaisesti.

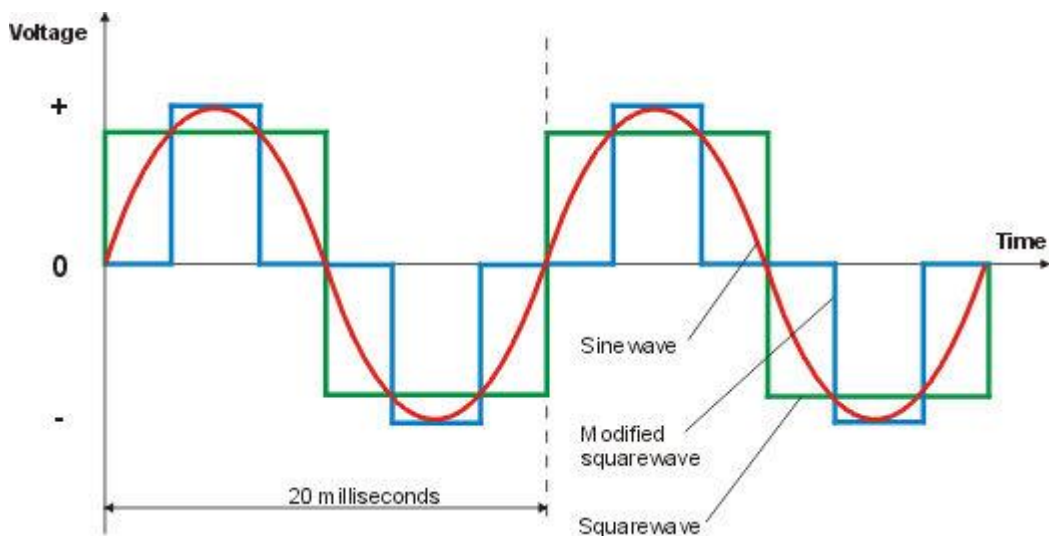
Maksimitehopisteen määrittämiseksi on kehitetty useita menetelmiä, joista yleisin on ns. ”Perturb & observe” –menetelmä. Menetelmä perustuu toimintapisteen muuttamiseen, jota seuraa tehon muutos. Jos teho kasvaa, toimintapistettä muutetaan samaan suuntaan virta-jännite-käyrällä. Jos teho pienenee, virta-jännite-käyrällä siirrytään toiseen suuntaan. Tällä tavalla maksimipistettä ei saavuteta, vaan käyrällä siirrytään koko ajan maksimitehopisteen ympäristössä. Tämän seurauksena lataussäätimen ulos tuleva latausvirta aaltoilee. (Mäki, 2011)

2.9.2 Invertteri

Akustosta jännite voidaan muuttaa kuormalaitteiston vaatimaan jännitetasoon muuntajalla tai vaihtosuuntaajalla eli invertterillä. Aurinkopaneelijärjestelmää käytetään usein esimerkiksi vapaa-ajan asunnoissa, joiden liittyminen valtakunnalliseen sähköverkkoon ei ole taloudellisesti kannattavaa. Aurinkopaneelijärjestelmän suorituskyky muodostaa

ylärajan käytettävissä olevalle teholle, mutta esimerkiksi valaistukseen ja pienien sähkölaitteiden käyttöön voi pienikin aurinkopaneelijärjestelmä riittää. Tällaisissa järjestelmissä tyypillisesti tuotetaan akuston tasajännitteestä 230 V vaihtojännitettä vaihtosuuntaajan avulla.

Vaihtosuuntaajien tyypillinen ongelma on epäsinimäinen ulostulojännitteen aaltomuoto. Invertteri tuottaa tasajännitettä, jonka itseisarvo ja suunta muuttuvat tietyn ajan välein. Jännitteen itseisarvo muuttuu siis porrasmaisesti ajan suhteen ja aaltomuoto säröytyy. Heikkolaatuisemmassa invertterissä muutosnopeus voi olla hitaampi ja jänniteportaat suurempia, jolloin aaltomuoto voi poiketa sinimäisestä merkittävästi. Tyypilliset ajoneuvokäyttöön tarkoitetut invertterit tuottavat kanttiaaltomuotoista jännitettä. Siniaaltoinvertterien aaltomuodosta käytetään nimitystä muokattu siniaalto. Kun muutosnopeus kasvaa ja jännitteen säätöportaat pienenevät, jänniteaalosta on mahdollista muodostaa entistä sinimäisempi. Aaltomuodosta ei ole mahdollista saada täysin sinimäistä, mutta poikkeama sinistä pienenee, kun invertterin säätötarkkuus paranee. Aaltomuotoa on havainnollistettu kuviossa 7.



KUVIO 7. Jännitteen käyrämuotojen vertailu (The engineering projects)

Kuviossa on esitetty puhdas siniaalto punaisella, muokattu siniaalto sinisellä ja kanttiaalto vihreällä. Kaikkien aaltomuotojen taajuus kuvassa on 50 Hz.

3 MITTAUSLAITTEISTO

3.1 Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorio

Tampereen ammattikorkeakoululla on opetuskäyttöön tarkoitettu sähkölaboratorio. Opiskelijat voivat valvotuissa olosuhteissa tehdä käytännön harjoituksia ja laboratoriotöitä. Tämän opinnäytetyön mittaukset suoritettiin TAMK:n sähkölaboratoriossa.

3.2 Greenlab

Greenlab on TAMK:n sähkölaboratorioon rakennettu mittausympäristö, jossa voidaan tehdä tutkimuksia ja mittauksia uusiutuvaan energiaan liittyen. Uusiutuvan energian käyttö tulee todennäköisesti lähitulevaisuudessa lisääntymään merkittävästi Suomessa ja Tampereen ammattikorkeakoulu pyrkii vastaamaan nousevan trendin mukaiseen kysyntään lisäämällä opetusta uusiutuvista energiamuodoista.

Uusiutuvien energioiden ja niiden käyttöön liittyvän tekniikan koulutusta tullaan lisäämään mm. sähkövoimatekniikan insinöörin tutkintokoulutuksessa. Aurinkosähköjärjestelmät liittyvät olennaisesti myös talotekniikan koulutukseen. Tällä hetkellä Greenlabissa on aurinkosähköjärjestelmä, kaksi erilaista pientuulivoimajärjestelmää ja laitteisto aaltovoiman demonstraatioon.

TAMK:n varsinaisten koulutusohjelmien lisäksi koulutusta pyritään myymään oppilaitoksen ulkopuolelle, ja lähitulevaisuudessa koulutustarjontaan on tulossa mm. eräänlainen ”Avaimet käteen” –koulutus aurinkosähköjärjestelmistä.

3.3 Greenlab-aurinkopaneelijärjestelmä

Tämän opinnäytetyön tutkimuskohteena on Greenlabin aurinkopaneelijärjestelmä. Järjestelmään sisältyy kaksi rinnankytkettyä yksikiderakenteista 240 Wp CentroSolar S240M60 Professional -aurinkopaneelia, pienempi 30 Wp Victron Energy VSP30M-12V –aurinkopaneeli, kaksi Victron Energy AGM 12-220 -akkua, Victron Energy MultiPlus

Compact C 24/1600/40 –invertteri, TriStar TS-MPPT-45 –lataussäädin, pieni sähkökeskus suojalaitteille sekä kaksi LG PSH0731B –valaisinta. Lisäksi 240 Wp aurinkopaneelien yhteyteen on asennettu kaksi rullaverhoa, joiden avulla voidaan simuloida aurinkopaneelien varjostusta. Aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen on dokumentoitu Tomi Kämäräisen opinnäytetyössä ”Greenlab, Aurinkosähköjärjestelmä” vuonna 2014.

3.3.1 Aurinkopaneelit

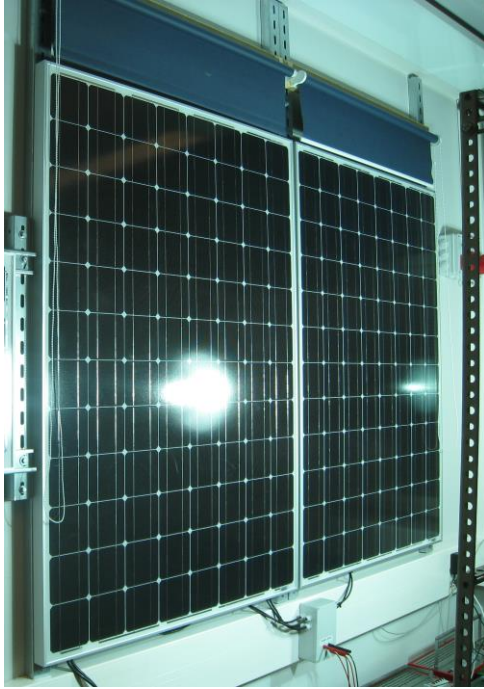
Suurempia, huipputeholtaan 240 Wp aurinkopaneeleita käytettiin tutkimuksissa sähköenergian tuotantoon. Mittausolosuhteita pyrittiin muuttamaan valaisimien ja rullaverhojen avulla. Aurinkopaneelien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. CentroSolar S240M60 Professional – aurinkopaneelin tekniset tiedot

P_{\max} / W	240
P_{\min} / W	232,8
U_{mp} / V	28,75
U_{oc} / V	36,53
I_{mp} / A	8,35
I_{sc} / A	8,7
$f_p / \%$	75,52
U_{\max} / V	1000
$Tol_{P_{mp}}(STC) / \%$	± 3
$TC_{P_{mp}} / \%/K$	-0,44
$TC_{U_{oc}} / \%/K$	-0,35
$TC_{I_{sc}} / \%/K$	0,03
T_{amb}	- 40 ... + 85

Taulukossa 1 P_{\max} on paneelin nimellisteho, P_{\min} on paneelin minimiteho, U_{mp} on paneelin jännite maksimitehopisteessä, U_{oc} on paneelin tyhjäkäyntijännite, I_{mp} on paneelin virta maksimitehopisteessä, I_{sc} on paneelin oikosulkuvirta, f_p on paneelin täyterroin, U_{\max} on järjestelmän maksimijännite, $Tol_{P_{mp}}(STC)$ on maksimitehopisteen mittaustarkkuus STC-olosuhteissa, $TC_{P_{mp}}$ on maksimitehopisteen lämpötilakerroin, $TC_{U_{oc}}$ on tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin, $TC_{I_{sc}}$ on oikosulkuvirran lämpötilakerroin ja T_{amb} on paneelin käyttölämpötila-alue.

Nimellisarvot on mitattu STC-olosuhteissa ja ne on kerätty paneelin datalehdeltä. Kuvassa 1 esitetään käytössä olevat aurinkopaneelit ja rullaverhot. Aurinkopaneelit on kytketty rinnan, joten niiden kokonaisoikosulkuvirta on likimain kaksinkertainen yhteen paneeliin verrattuna. Paneelit ovat harvoin täysin identtisiä, mutta teoriassa paneelien yhteenlaskettu oikosulkuvirta standardimittausolosuhteissa on noin 17,4 A.



KUVA 1. CentroSolar S240M60 Professional –aurinkopaneelit ja rullaverhot

Pienempää, huipputeholtaan 30 Wp aurinkopaneelia käytettiin säteilyintensiteetin mittaukseen. Paneelin navat oikosuljettiin ja mitattiin oikosulkuvirta valaisimen eri etäisyyksillä. Säteilyintensiteetin yhtälön (3) mukaisesti mitatusta oikosulkuvirrasta voitiin laskea kunkin mittaustilanteen säteilyintensiteetti. Taulukossa 2 on esitetty paneelin tekniset tiedot.

TAULUKKO 2. Victron Energy VSP30M-12V – aurinkopaneelin tekniset tiedot

P_{\max} / W	30
U_{mp} / V	18
U_{oc} / V	22,5
I_{mp} / A	1,67
I_{sc} / A	2
$U_{\text{max}} / \text{V}$	1000
$Tol_{P_{\text{mpp}}(\text{STC})} / \%$	> 0
$TC_{P_{\text{mpp}}} / \%/K$	-0,48
$TC_{U_{\text{oc}}} / \%/K$	-0,34
$TC_{I_{\text{sc}}} / \%/K$	0,037
T_{amb}	- 40 ... + 85

Taulukossa 2 P_{\max} on paneelin nimellisteho, U_{mp} on paneelin jännite maksimitehopisteessä, U_{oc} on paneelin tyhjäkäyntijännite, I_{mp} on paneelin virta maksimitehopisteessä, I_{sc} on paneelin oikosulkuvirta, U_{max} on järjestelmän maksimijännite, $Tol_{P_{\text{mpp}}(\text{STC})}$ on maksimitehopisteen mittaustarkkuus STC-olosuhteissa, $TC_{P_{\text{mpp}}}$ on maksimitehopisteen lämpötilakerroin, $TC_{U_{\text{oc}}}$ on tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin, $TC_{I_{\text{sc}}}$ on oikosulkuvirran lämpötilakerroin ja T_{amb} on paneelin käyttölämpötila-alue.

Nimellisarvot on mitattu STC-olosuhteissa ja tiedot on kerätty aurinkopaneelin tyyppikilpitarrasta. Kuvassa 2 esitetään käytössä ollut 30 W aurinkopaneeli.



KUVA 2. Victron Energy VSP30M-12V –aurinkopaneeli

3.3.2 Lataussäädin

Lataussäädintä käytetään akuston latausvirran maksimointiin aurinkopaneelijärjestelmässä. Säädin analysoi paneelien virtaa ja jännitettä ja optimoi muuntosuhteen nopeasti olosuhteiden ja siten maksimitehopisteen muuttuessa. Laitteen sisäinen algoritmi mahdollistaa maksimitehopisteen jäljityksen ja energian siirtämisen akustoon jopa 99 % hyötysuhteella. Laite voidaan kytkeä tietoverkkoon Ethernet –liitännällä, jolloin sitä voidaan ohjata ja tarkkailla etäältä. Laite voi kerätä mittausdataa viimeisen 200 vuorokauden ajalta. TriStar TS-MPPT-45 –lataussäätimen tekniset tiedot on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. TriStar TS-MPPT-45 –lataussäätimen tekniset tiedot

I_{\max} / A	45
$P_{\max}(12 V) / W$	600
$P_{\max}(24 V) / W$	1200
$P_{\max}(48 V) / W$	2400
$\eta_p / \%$	99
U_n / V	12 / 24 / 36 / 48
$U_{oc\max} / VDC$	150
U_{akku} / VDC	8 ... 72
P_o / W	2,7

Taulukossa 3 I_{\max} on säätimen maksimilatausvirta, P_{\max} on jännitetasosta riippuva säätimen nimellisteho, η_p on säätimen hyötysuhteen huippuarvo, U_n on nimellinen latausjännite, $U_{oc\max}$ on aurinkopaneelien suurin sallittu oikosulkuvirta, U_{akku} on akustojen sallittu jännitealue ja P_o on säätimen itsensä kuluttama teho. Tiedot on kerätty säätimen datalehdeltä. Käytössä ollut lataussäädin on esitetty kuvassa 3.



KUVA 3. TriStar TS-MPPT-45 –lataussäädin

3.3.3 Akusto

Aurinkopaneelien tuottaman energian varastona on kaksi 12 V Victron Energy AGM 12-220 –syväpurkausakkua (Kuva 4). Yhden akun kapasiteetti on 220 Ah ja elinikä 400 sykliä 80 % purkautumisella. Sarjaan kytkettynä akuston jännite on 24 V ja kapasiteetti 220 Ah.



KUVA 4. Victron Energy AGM 12-220-akusto

3.3.4 Invertteri

Invertterillä akustoon kerätty energia voidaan muuttaa 24 V tasajännitteestä sinimuotoiseksi 230 V vaihtojännitteeksi. Käytössä ollut Victron Energy MultiPlus Compact C 24/1600/40 on monipuolinen ja älykäs laite aurinkopaneelijärjestelmiin. Sitä voidaan käyttää varavoimajärjestelmän ohjaukseen sähkökatkon tapahtuessa. Toisin sanoen, osaksi kiinteää sähköverkkoa kytkettynä sähkönjakelun katketessa se pystyy syöttämään kuormitusta niin nopeasti, että tietokoneet ja muu elektroniikka eivät ehdi häiriintyä. Kolmella laitteella on mahdollista muodostaa kolmivaiheinen jännitesyöttö. Laitteen tyhjäkäynnillä tai alhaisella kuormituksella kuluttaman energian vähentämiseksi laitteessa on ”Search”- ja ”Automatic Economy Switch” –tilat. ”Search”- moodissa laite käynnistyy lyhyeksi ajaksi kahden sekunnin välein ja asetetun kuormitusrajan ylittyessä se käynnistyy jatkuvaan tilaan. ”Automatic Economy Switch” –tilassa alhaisella kuormituksella laite alentaa sinijännitteen amplitudia vähäisesti ja kuormituksen ylittäessä asetteluarvon laite nostaa jännitteen takaisin 230 volttiin. Invertteriä ei käytetty aurinkopaneelien virtajännite-käyrän mittauksissa, mutta sen tuottaman 230 V vaihtojännitteen laatua tutkittiin oskilloskoopilla. Invertterin tekniset tiedot on esitetty taulukossa 4 ja ne on kerätty valmistajan datalehdeltä.

TAULUKKO 4. Victron Energy MultiPlus Compact–invertterin tekniset tiedot

U_{in} / VDC	9,5-17 / 19-33 / 38-66
U_{out} / VAC	$230 \pm 2 \%$
$f_{U_{out}}$ / Hz	$50 \pm 0,1 \%$
S_{cont} / VA	600
P_{cont} / W (25 °C)	1300
P_{cont} / W (40 °C)	1200
P_{peak} / W	3000
η_{max} / %	93 / 94

Taulukossa 4 U_{in} on invertteriin sisään tulevan tasajännitteen toiminta-alueet, U_{out} on invertteriltä ulostuleva vaihtojännite, f_{out} on ulos tulevan jännitteen taajuus, S_{cont} on invertterin jatkuva näennäisteho, P_{cont} on ympäristön lämpötilasta riippuva invertterin pätöteho, P_{peak} on invertterin hetkellinen pätötehon huippuarvo ja η_{max} on invertterin maksimihyötysuhde. Käytössä ollut invertteri on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Victron Energy MultiPlus Compact C 24/1600/40 –invertteri/laturi

3.3.5 Suojauskeskus

Aurinkosähköjärjestelmän suojaukseen käytetyt suojalaitteet on asennettu pieneen koteloon. Kotelossa on paneelien ja lataussäätimen välissä Hager C 40 -johdonsuojakytkin, akuston ja invertterin välissä 63 A 22x58 putkisulake. Invertterin ja pistorasian välissä on Hager C 10 -johdonsuojakytkin ja FaG -vikavirtasuojakytkin. Lisäksi lataussäätimen ja akuston välissä on 40 A ANL sulake erillisessä kotelossaan akkukotelon yhteydessä. Aurinkosähköjärjestelmän suojauskeskus on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Suojauskeskus

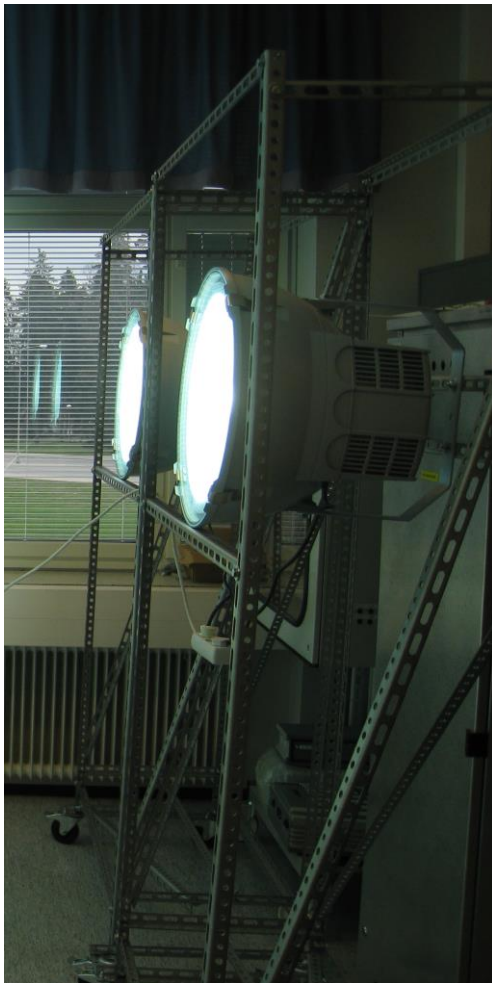
3.3.6 Valaisimet

Aurinkopaneelien valaisemiseen käytettiin LG PSH0731B – rikkiplasmavalaisimia. Valaisintyyppi on tarkoitettu korkeiden sisätilojen valaistukseen. Valaisimen tuottama valo on ominaisuuksiltaan lähes auringonvalon kaltaista. Auringonvalon kaltaista valoa on mahdotonta tuottaa, mutta valaisimen valoteho ja monipuolinen valon spektri ovat tärkeitä ominaisuuksia auringonvalon simuloinnissa. Valaisimia on kaksi kappaletta ja ne on asennettu siirrettäviin telineisiin. Valaisimien valokeilan kulma on 120° . Valaisimen tekniset tiedot on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. LG PSH0731B –valaisimen tekniset tiedot

U_n / V	220 - 240 / 50 Hz
I_n / A	3,5
P_n / W	730
P_{hf} / W	550
f_h / MHz	2450 ± 50
Magnetron	2M214-03RIS7
F / lm	58500
η_{opt} / lm/W	80
Väriämpötila / K	4500 / 6500 / 7500
CRI / Ra	80

Taulukossa 5 U_n on valaisimen nimellinen käyttöjännite, I_n on valaisimen nimellisvirta, P_n on valaisimen käyttämä nimellisteho, P_{hf} on korkeataajuinen valoteho, f_h on korkein taajuus, F on valaisimen valovirta, μ_{opt} on valotehon hyötysuhde ja CRI on värintoistoindeksi (Colour Rendering Index). Tiedot on kerätty valaisimen käyttöoppaasta. Kuvassa 7 on esitetty valaisimet telineissään.



KUVA 7. LG PSH0731B –valaisimet

3.3.7 Mittauslaitteet ja -välineet

Työssä käytettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorion välineitä ja laitteita. Tutkimuksissa käytettiin laboratorion mittareita ja oskilloskooppeja. Aurinkopaneelin kuormituksessa käytettiin laboratorion vastuslaitteistoja.

Virran, jännitteen ja resistanssien mittauksessa käytettiin Fluke 189 ja 87 -yleismittareita. Paneelien lämpötilaa mitattiin yleismittariin kytketyllä termoparilla. Lataussäätimen ja invertterin toiminnan tutkimisessa käytettiin lisäksi Fluke 123 Scopemeter – oskilloskooppia ja siihen liitettäviä virtapihtejä. Virtapihdeillä pystyttiin mittaamaan lataussäätimen ja paneelien virtoja katkaisematta virtapiiriä. Oskilloskoopilla pystyttiin myös tarkastelemaan invertterin tuottaman vaihtojännitteen aaltomuotoa.

Aurinkopaneelijärjestelmän sähköisiä ominaisuuksia ei työn alussa tunnettu, joten mittaukset suunniteltiin standardimittausolosuhteiden mukaisten nimellisarvojen perusteella. Yhden paneelin nimellinen oikosulkuvirta standardimittausolosuhteissa on 8,7 A ja kahden rinnankytketyn paneelin oikosulkuvirta siten noin 17,4 A. Turvalliseen mittaukseen soveltuvaa virrankestoltaan riittävää säätövastusta ei laboratoriossa ollut. Siten mittauksissa päädyttiin käyttämään laboratorion vastuslaitteistoja kuormituksen säätämiseen (Kuva 8).



KUVA 8. Vastuslaitteistot

Erilaisilla vastusten sarjaan- ja rinnankytkennöillä voitiin muuttaa aurinkopaneelin kuormitusta. Vastuslaitteistot ovat suurehkoja laatikoita, joissa on rinnankytkettinä viisi erisuuruista resistanssia. Resistanssit on erotettu toisistaan kytkimillä ja jokaista resistanssia suojaaa oma johdonsuojakytkin. Käytössä olleiden punaisten laitteistojen nimellisjännite on 230 V ja vihreiden 50 V. Vastuslaitteistojen kilpiarvot on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Vastuslaitteistojen kilpiarvot

UN = 230 V					
	R1	R2	R3	R4	R5
R _N / Ω	960	480	240	120	60
I _N / A	0,24	0,48	0,96	1,92	3,83
Johdonsuojak.	K 0,3 A	K 0,5 A	K 1 A	K 2 A	K 4 A
UN = 50 V					
	R1	R2	R3	R4	R5
R _N / Ω	200	100	50	25	12,5
I _N / A	0,24	0,48	0,96	1,92	3,83
Johdonsuojak.	K 0,25 A	K 0,5 A	K 1 A	K 2 A	K 4 A

Vastuslaitteistojen resistanssin mitattiin kahdesta punaisesta ja kahdesta vihreästä laitteistosta. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Vastuslaitteistojen resistanssit

	Vastukset 230V						Vastukset 50V				
	R1/Ω	R2/Ω	R3/Ω	R4/Ω	R5/Ω		R1/Ω	R2/Ω	R3/Ω	R4/Ω	R5/Ω
Nimellinen	960	480	240	120	60	Nimellinen	200	100	50	25	12,5
Mitattu 1	994,3	485,3	238,3	126	63,9	Mitattu 1	221,2	107,1	51,2	25,9	13
Mitattu 2	978,5	474,8	241,7	127	63,04	Mitattu 2	287,5	139,5	81,8	34,2	72

Toinen vihreistä 50 V laitteistoista poikkesi merkittävästi kilpiarvoistaan. Laitteistoa voitiin kuitenkin käyttää, koska resistanssiarvojen tarkka määrittäminen ei mittausten kannalta ollut tärkeää. Mittaustulostaulukoissa on resistanssit esitetty kilpiarvojen mukaisesti laskettuna.

Aurinkopaneelijärjestelmän virta-jännite-käyrien analysoinnin jälkeen voitiin käyttää laboratorion 0 – 1000 Ω säätövastusta, jonka virrankesto on 0,55 A (Kuva 9).

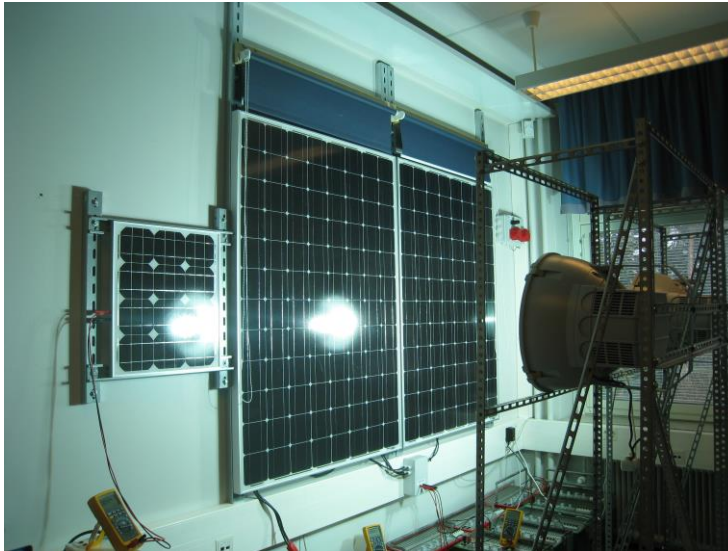


KUVA 9. Säästövastus

4 MITTAUKSET

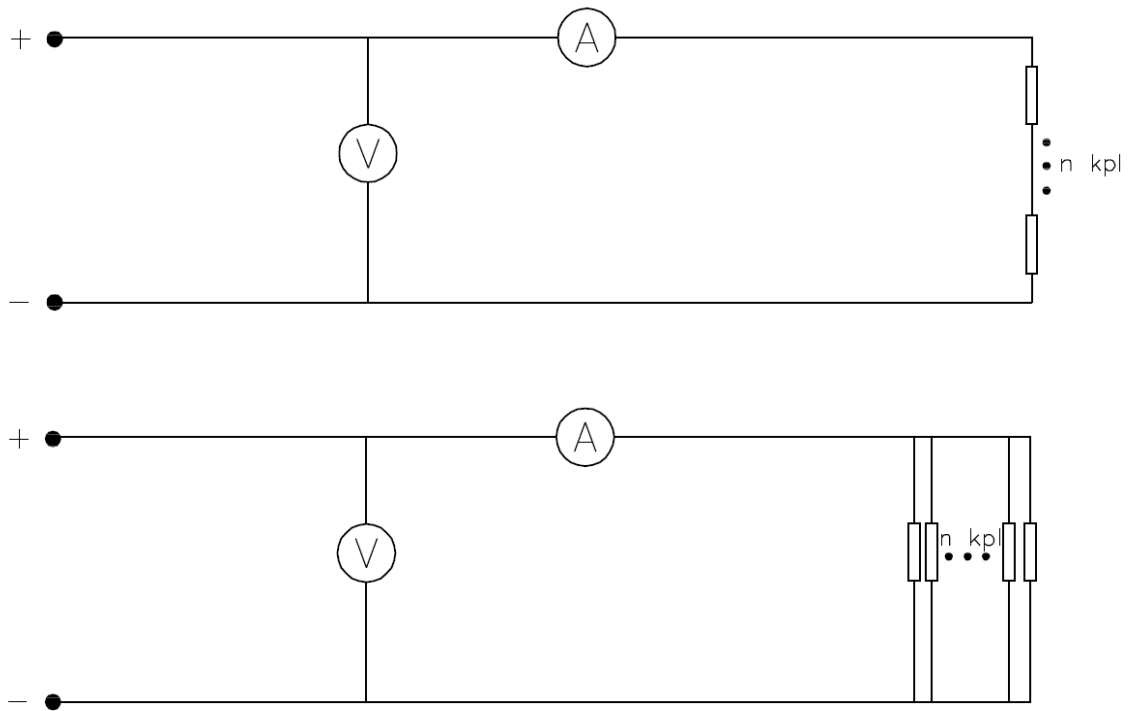
4.1 Virta-Jännite-käyrä kohtisuorassa valaistuksessa

Aluksi paneelien virta-jännite-käyrää tutkittiin täydessä valaistuksessa. Valaisimet asetettiin kohtisuoraan noin 1 m etäisyydelle paneeleista (Kuva 10).



KUVA 10. Mittaustilanne

Kuormitusta muutettiin vastuslaitteistojen erilaisilla sarjaan- ja rinnankytkennöillä. Ensimmäisessä mittauksessa ei ollut käsitystä siitä, minkä suuruisilla resistansseilla mittauksia on järkevää tehdä. Etukäteen arvioitu mittausalue osoittautui liian kapeaksi, ja mittaukset tehtiin kokeilemalla eri resistansseja. Taulukossa 7 on esitetty vastuslaitteistojen resistanssit, joita kytkettiin sarjaan ja rinnan eri kuormien muodostamiseksi. Mittauskytkennät on esitetty kuviossa 8.



KUVIO 8. Mittauskytkennät

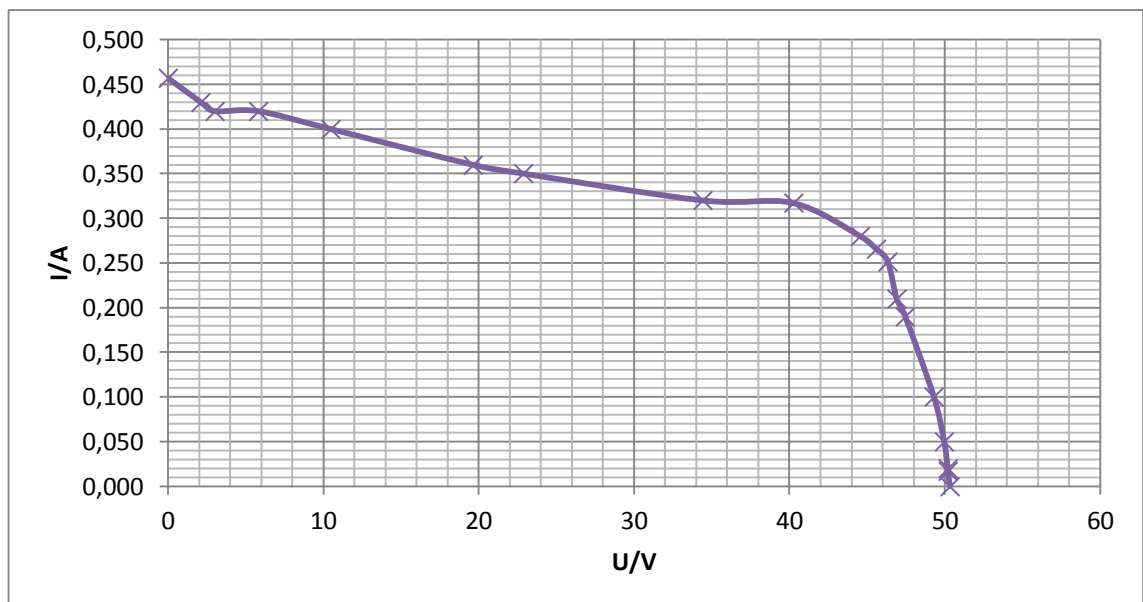
Kaikilla kuormilla mitattiin piirin virta ja kuorman yli vaikuttava jännite yleismittareilla. Lopuksi mitattiin paneelien oikosulkuvirta ja tyhjäkäyntijännite. Pienen 30 W paneelin oikosulkuvirta mitattiin yleismittarilla ja aurinkopaneelien lämpötila mitattiin sekä infrapunamittarilla, että yleismittariin kytketyllä termoparilla. Paneelien mitattu lämpötila oli tässä mittauksessa 24,6 °C.

Paneelien teho laskettiin kussakin mittauspisteessä virran ja jännitteen tulona. Mittaus- ja laskentatulokset kirjattiin taulukkoon 8.

TAULUKKO 8. Mittaus- ja laskentatulokset

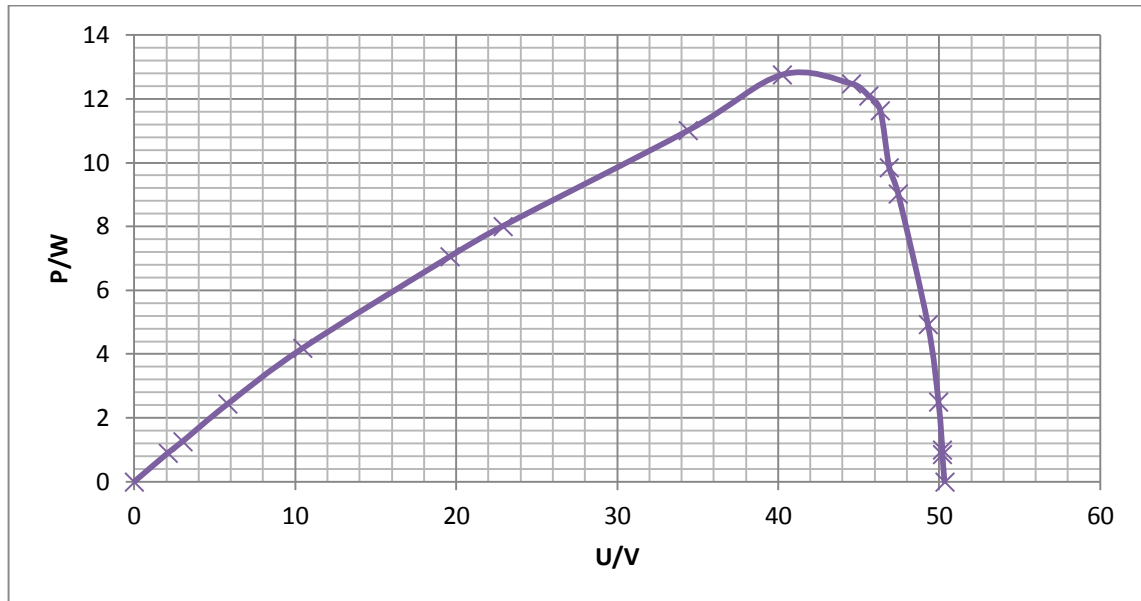
R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,457	0
4,166667	2,11	0,430	0,91
6,25	3,01	0,420	1,26
12,5	5,80	0,420	2,44
25	10,46	0,400	4,18
50	19,60	0,360	7,06
60	22,89	0,350	8,01
100	34,40	0,320	11,01
120	40,25	0,317	12,76
150	44,55	0,280	12,48
162,5	45,60	0,266	12,11
175	46,34	0,251	11,65
200	46,90	0,210	9,85
240	47,46	0,190	9,02
480	49,30	0,100	4,93
960	49,96	0,050	2,50
1920	50,20	0,020	1,00
2880	50,20	0,017	0,85
∞	50,33	0	0

Taulukon mittaustuloksien pohjalta piirrettiin kuviossa 9 näkyvä kuvaaja virrasta jännitteen funktiona, eli paneelien virta-jännite-käyrä.



KUVIO 9. Paneelien virta jännitteen funktiona

Käyrältä havaittiin pisteet, joiden välisellä alueella käyrä kaartuu, joten mittauspisteitä lisättiin niiden välille. Lisäksi piirrettiin kuvaaja paneelien tehosta jännitteen funktiona (Kuvio 10).



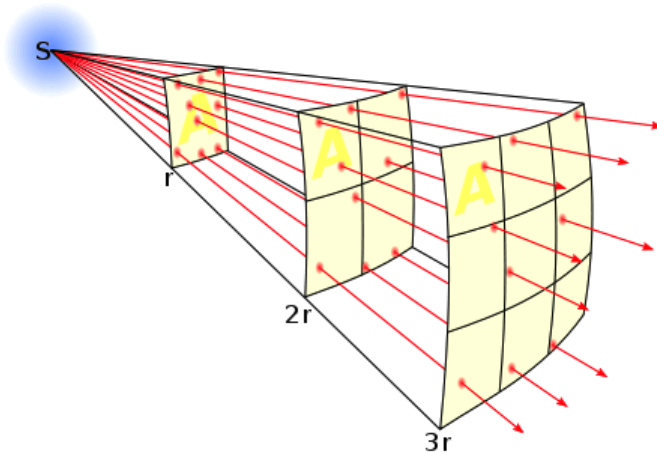
KUVIO 10. Paneelien teho jännitteen funktiona

Tehon kuvaajasta havaittiin käyrän korkein piste, jossa teho on suurimmillaan. Mittauspisteessä teho on lähellä maksimitehopistettä. Tämän pisteen molemmin puolin lisättiin mittauspisteitä, eli resistanssia pyrittiin lisäämään ja vähentämään mittauspisteen resistanssin arvosta mahdollisimman pienin askelin. Käytössä olleet vastuslaitteistot määrittivät askelten suuruuden, eikä kaikissa tilanteissa pystytty muuttamaan resistanssia halutulla tavalla eli riittävän pienin askelin. Mittaustulosten perusteella maksimiteho saavutettiin noin $100 - 150 \Omega$ kuormituksella ja korkein mitattu teho saavutettiin kilpiarvoltaan 120Ω kuormalla. Suurin mitattu teho oli $12,76 \text{ W}$. Maksimitehopisteen tarkempi määrittäminen tehtiin myöhemmässä mittauksessa. Tästä mittauksesta saatiin virta-jännite-käyrä, jota voitiin käyttää vertailukohtana tulevilla mittauksilla.

4.2 Säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään

Tässä mittauksessa pyrittiin havainnollistamaan säteilyintensiteetin vaikutusta paneelien virta-jännite-käyrään. Käytössä olleet valaisimet kuitenkin osoittautuivat säteilyintensiteetiltään huomattavasti odotettua heikommiksi eikä mittaus toteutunut suunnitellulla tavalla. Säteilyintensiteettiä säädeltiin muuttamalla valaisimien lukumäärää ja etäisyyttä paneelista. Aluksi mitattiin valaisimen tuottama säteilyintensiteetti kohtisuoraan 30 W aurinkopaneelia vasten asetettuna. Valaisinta siirrettiin eri etäisyyksille ja mitattiin paneelin oikosulkuvirta. Mittaukset samoilla etäisyyksillä toistettiin kahdella valaisimella.

Valaisimen säteilyintensiteetti vaimenee etäisyyden kasvaessa käänteisen neliön lain mukaisesti eli esimerkiksi etäisyyden kolminkertaistuessa intensiteetti jakautuu kolmen toisella potenssilla. Valaisimesta lähtevät säteet erkanevat toisistaan etäisyyden kasvaessa, eli sama määrä säteitä osuu suuremmalle pinta-alalle etäisyyden kasvaessa. Pinta-alayksikköä kohden saapuvien valonsäteiden lukumäärä siis laskee (Kuvio 11).



KUVIO 11. Säteilyintensiteetin heikkeneminen etäisyyden kasvaessa (The Physics Classroom, 2012)

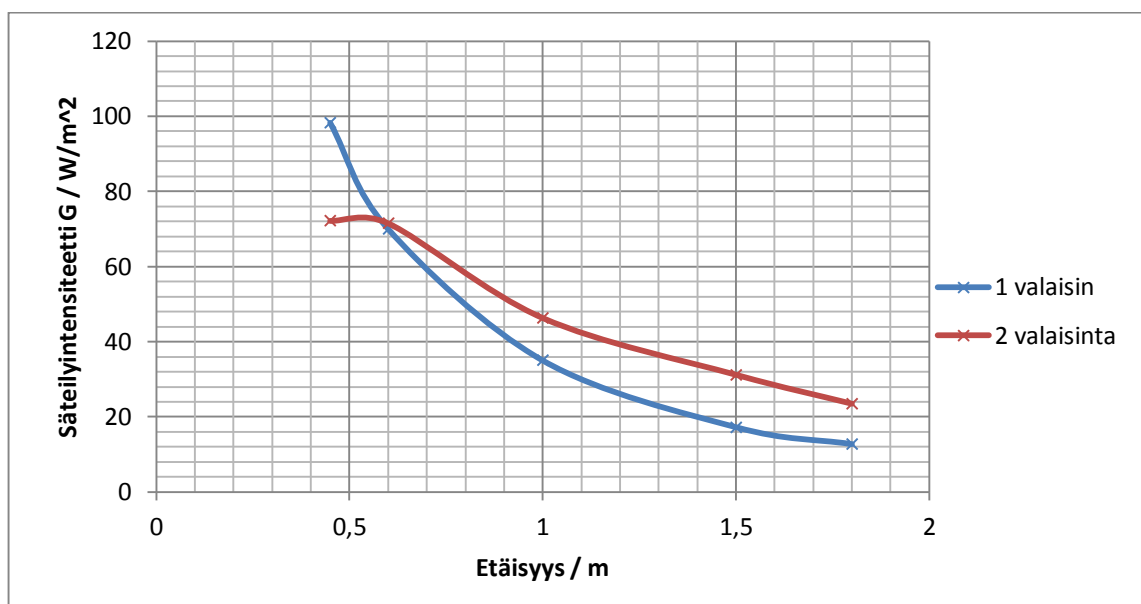
Kuviosta nähdään, että etäisyyden r kolminkertaistuessa sama määrä säteilyä hajaantuu 9-kertaiselle pinta-alalle. On myös huomioitava, että kuvan pinta-alat eivät ole tasaisia pintoja, vaan säteilylähteen ympärillä olevan pallon pinta-aloja, jolloin pisteet ovat yhtä suurella etäisyydellä keskipisteestä. Tämän mittauksen kannalta vaikutus on minimaalinen, joten ideaa voidaan soveltaa suoriin aurinkopaneeliin.

Mittauksessa käytetyn paneelin ja viereisen työpöydän sijoittelu tilassa johti siihen, ettei kahta valaisinta mahtunut sijoittamaan symmetrisesti paneeliin nähden. Tämä saattaa josain määrin vääristää säteilyintensiteetin mittaustuloksia kahdella valaisimella. Lisäksi pienillä etäisyyksillä paneeli sijoittuu valokeilojen väliin, jolloin mitattu oikosulkuvirta perustuu lähinnä hajavaloon. Aurinkopaneelin mitatuista oikosulkuvirroista johdettiin säteilyintensiteetit yhtälön 4 mukaisesti. Mitatut oikosulkuvirrat ja niiden perusteella lasketut säteilyintensiteetit on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Oikosulkuvirrat ja säteilyintensiteetit

Etäisyys/m	1 valaisin		2 valaisinta	
	Isc/A	G/ W/m ²	Isc/A	G/ W/m ²
0,45	0,1965	98,25	0,1443	72,15
0,6	0,14	70	0,143	71,5
1	0,07	35	0,0926	46,3
1,5	0,0345	17,25	0,0624	31,2
1,8	0,0255	12,75	0,047	23,5

Tulosten perusteella piirrettiin kuvaajat säteilyintensiteetistä etäisyyden funktiona (Kuvio 12). Samassa koordinaatistossa on esitetty tulokset yhdellä ja kahdella valaisimella.



KUVIO 12. Valaisimien säteilyintensiteetti etäisyyden funktiona

Kuviosta nähdään, että kahdella valaisimella saadaan hieman suurempi säteilyintensiteetti kuin yhdellä. Suhteessa yhteen valaisimeen intensiteetti kasvaa, mitä kauemmaksi valaisinta siirretään. Tämä on seurausta siitä, että valaisimien valokeilat osuvat päällekkäin paneeliin. Alle 0,6 m etäisyydellä paneeli jäi valokeilojen väliin eikä säteilyintensiteetti enää nostanut paneelin oikosulkuvirtaa lähestyttäessä sitä.

Säteilyintensiteetille laskettiin teoreettiset arvot vastaavilla etäisyyksillä. Itse säteilyn lähteen eli polttimon arvioitiin olevan noin 30 cm valaisimen sisällä ja tämä huomioitiin laskuissa. Mittausetäisyyksiä ja säteilyintensiteettejä verrattiin 0,45 m etäisyyteen ja sillä laskettuun intensiteettiin.

Etäisyyden kerroin laskettiin yhtälöllä

$$n = \frac{x + 0,30 \text{ m}}{0,45 \text{ m} + 0,30 \text{ m}} \quad (5)$$

, jossa n on etäisyyden kerroin ja x on mittausetäisyys.

Säteilyintensiteetti laskettiin yhtälöllä

$$G = \frac{98,25 \text{ W/m}^2}{n^2} \quad (6)$$

, jossa G on mittauspisteen säteilyintensiteetti ja n on etäisyyden kerroin

Taulukossa 12 on vertailtu laskettuja ja mitattuja säteilyintensiteetin arvoja yhdellä valaisimella.

TAULUKKO 12. Säteilyintensiteettien laskentatulokset

Etäisyys/ m	Etäisyyden kerroin	Laskettu G / W/m ²	Mitattu G/ W/m ²
0,45	1,00	98,25	98,25
0,6	1,20	68,23	70,00
1	1,73	32,70	35,00
1,5	2,40	17,06	17,25
1,8	2,80	12,53	12,75

Teoreettiset ja mittaustulosten perusteella lasketut arvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Tätä mittausta voitiin siten pitää onnistuneena.

Virta-jännite-käyrän tutkimuksessa mitattiin jälleen paneelien virrat ja jännitteet eri kuormituksilla sekä oikosulku- ja tyhjäkäyntitilanteissa. Valaisimien etäisyyttä paneeleista muutettiin säteilyintensiteetin muuttamiseksi. Laboratorion tilojen puitteissa suurin mahdollinen etäisyys on noin 1,8 m. Valaisimelle laskettiin pienin mahdollinen etäisyys, jolla valo keila peittää koko paneelin pinta-alan. Kennoston korkeus on 1,52 m ja leveys 1,01 m. Paneelin kennoston lävistäjä laskettiin Pythagoraan lauseen mukaisesti yhtälöllä

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(1,52 \text{ m})^2 + (1,01 \text{ m})^2} \approx 1,83 \text{ m} \quad (7)$$

, jossa c on kennoston lävistäjä, a on kennoston korkeus ja b on kennoston leveys.

Valmistajan mukaan valaisimen valokeilan kulma on 120° , joten minimietäisyys voitiin laskea sinilauseen avulla. Valokeilan kaksiulotteinen profiili muodostuu kahdesta suorakulmaisesta kolmiosta, jossa etäisyyttä mallintavan sivun vastainen kulma on suuruudeltaan 30° ja lävistäjän puolikasta mallintavan sivun vastainen kulma suuruudeltaan on 60° . Valaisimen minimietäisyys laskettiin yhtälöllä

$$x = \frac{0,5 \cdot c \cdot \sin(30^\circ)}{\sin(60^\circ)} = \frac{0,5 \cdot 1,83 \text{ m} \cdot \sin(30^\circ)}{\sin(60^\circ)} \approx 0,53 \text{ m} \quad (8)$$

, jossa x on valaisimen etäisyys paneelista ja c on paneelin kennoston lävistäjä.

Etäisyydellä $0,53 \text{ m}$ valaisimen valokeila peittää koko kennoston, jos se on asetettu täydellisesti keskelle paneelia. Valaisimien täydellinen kohdistaminen paneelin keskelle on kuitenkin mahdotonta, koska valaisimen korkeus telineessä ei ole sama, kuin paneelin keskilinjan. Tätä etäisyyttä lähempänä valokeila ei peitä koko kennostoa, joten tasaista säteilyintensiteettiä ei voi muodostaa koko paneelille. Paneelin ja valaisimien korkeuserosta johtuen mittaukset suoritettiin etäisyydellä $0,6 \text{ m}$ ja tilan rajoittamalla maksimietäisyydellä $1,8 \text{ m}$. Lisäksi suoritettiin yksi mittaus käyttämällä vain yhtä valaisinta etäisyydellä 1 m . Mittauskytkentä oli edellisen mittauksen kaltainen (Kuvio 8).

Taulukossa 12 esitettyjen laskettujen säteilyintensiteettien mukaisesti laskettiin teoreettiset oikosulkuvirrat etäisyyksillä $0,6 \text{ m}$, $1,0 \text{ m}$ ja $1,8 \text{ m}$ yhtälöllä 3. Rinnankytkettyjen paneelien oikosulkuvirta on noin $17,4 \text{ A}$ standardimittausolosuhteissa. Lämpötila oli mittauksissa noin $24 - 25^\circ \text{C}$, joten sillä ei ole vaikutusta laskelmiin.

$$I_{sc(0,6m)} = \frac{G \cdot I_{sc(STC)}}{G_{STC}} = \frac{70 \frac{W}{m^2} \cdot 8,7 A}{1000 \frac{W}{m^2}} \approx 0,609 A \quad (3)$$

$$I_{sc(1,0m)} = \frac{G \cdot I_{sc(STC)}}{G_{STC}} = \frac{35 \frac{W}{m^2} \cdot 8,7 A}{1000 \frac{W}{m^2}} \approx 0,305 A$$

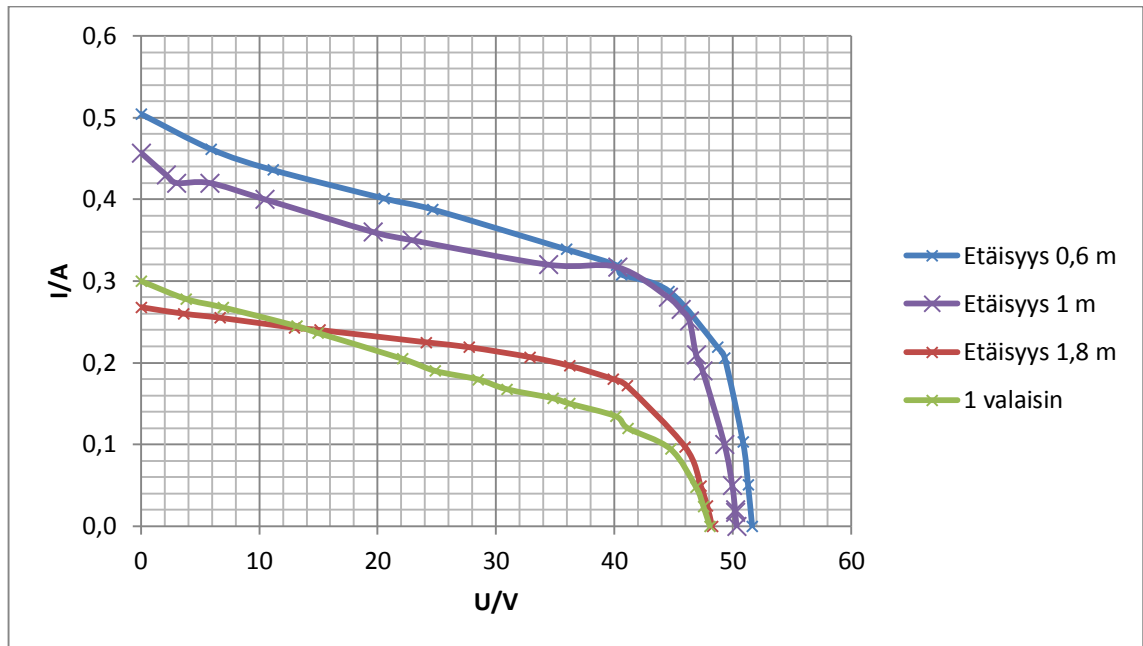
$$I_{sc(1,8m)} = \frac{G \cdot I_{sc(STC)}}{G_{STC}} = \frac{12,75 \frac{W}{m^2} \cdot 8,7 A}{1000 \frac{W}{m^2}} \approx 0,111 A$$

Paneelien lämpötila, virta ja jännite mitattiin eri kuormilla. Paneelien teho laskettiin kussakin pisteessä virran ja jännitteen tulona. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Mittaus- ja laskentatulokset

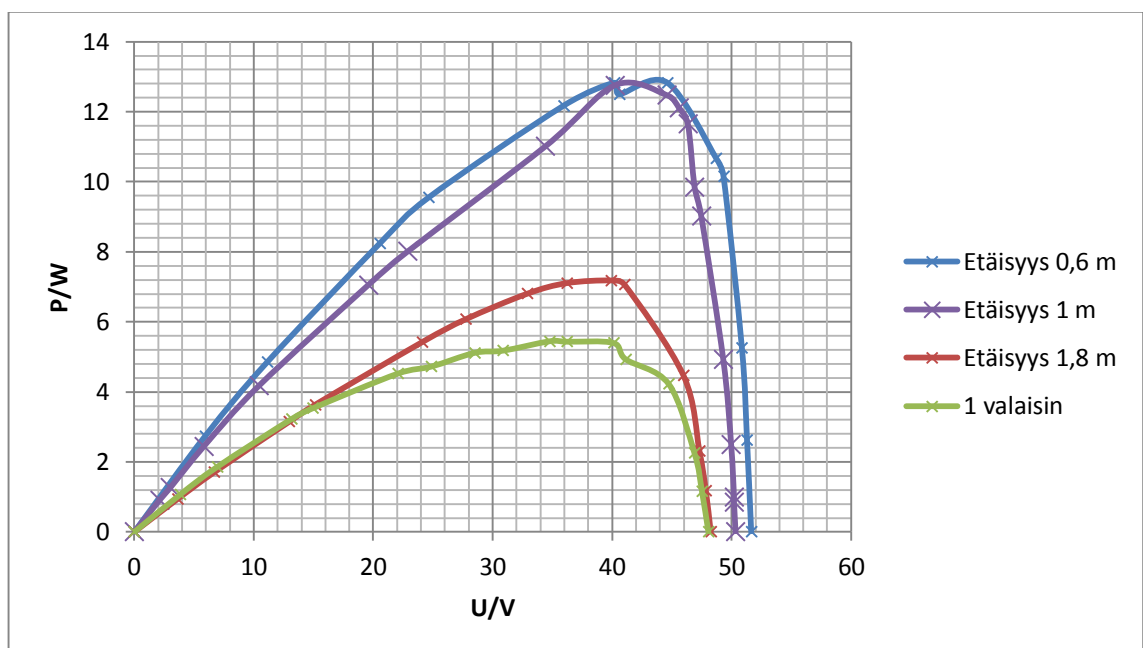
Etäisyys 0,6 m				Etäisyys 1,8 m				1 valaisin			
R/Ω	U/V	I/A	P/W	R/Ω	U/V	I/A	P/W	R/Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,504	0	0	0	0,268	0	0	0	0,300	0
12,5	5,936	0,461	2,738	12,5	3,61	0,260	0,939	12,5	3,8157	0,278	1,061
25	11,138	0,436	4,855	25	6,69	0,255	1,706	25	6,944	0,268	1,859
50	20,54	0,401	8,237	50	12,95	0,243	3,144	50	13,14	0,245	3,219
60	24,65	0,388	9,554	60	15,135	0,240	3,632	60	14,926	0,237	3,530
100	35,92	0,339	12,170	100	24,1	0,225	5,423	100	22,06	0,205	4,522
120	40,166	0,319	12,825	120	27,73	0,219	6,073	120	24,85	0,190	4,722
125	40,589	0,308	12,501	150	32,87	0,207	6,801	150	28,48	0,180	5,115
150	44,611	0,288	12,830	175	36,2	0,196	7,106	175	30,88	0,168	5,179
200	48,717	0,219	10,664	200	39,9	0,180	7,182	200	34,78	0,157	5,447
240	49,322	0,206	10,150	240	41,05	0,172	7,056	240	36,22	0,150	5,433
480	50,86	0,103	5,259	480	45,97	0,097	4,468	275	40,12	0,135	5,396
960	51,29	0,051	2,621	960	47,307	0,049	2,313	300	41,12	0,120	4,934
∞	51,64	0	0	1920	47,844	0,025	1,177	480	44,73	0,095	4,227
				∞	48,25	0	0	960	46,89	0,048	2,251
								1920	47,518	0,024	1,159
								∞	48,06	0	0

Mitatut oikosulkuvirrat eroavat lasketuista noin 0,1- 0,2 A, joten skaala on oikea, ja tulokset teorian mukaiset. Näin pienillä teholumilla suhteellinen virhe on suuri. Tuloksia verrattiin lähtötilanteen mittaustuloksiin ja virta-jännite-käyrät eri olosuhteissa piirrettiin samaan koordinaatistoon (kuvio 13).



KUVIO 13. Säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään

Valaisimien heikosta säteilyintensiteetistä johtuen erot virta-jännite-käyrissä ovat toivottua pienempiä ja suhteellinen virhemarginaali on siten suurempi. Mittaustuloksien tarkkuudesta huolimatta käyristä voidaan kuitenkin havaita säteilyintensiteetin vaikutus. Säteilyintensiteetin kasvaessa oikosulkuvirta kasvaa selkeästi ja tyhjäkäyntijännite vain vähäisesti. Etäisyyksillä 0,6 m ja 1,8 m mitatut virta-jännite-käyrät eroavat selkeästi toisistaan. Mittaustuloksien pohjalta laskettujen tehojen käyrät piirrettiin samaan koordinaatistoon kuvioon 14.



KUVIO 14. Säteilyintensiteetin vaikutus teho-jännite-käyrään

Kuviosta on selkeästi havaittavissa säteilyintensiteetin vaikutus paneelien tehoon. Etäisyydellä 0,6 m paneelien teho on lähes kaksinkertainen verrattuna tehoon 1,8 m etäisyydellä. Yhtälön 3 mukaisesti laskettiin suurien paneelien mitattujen oikosulkuvirtojen perusteella mittausten teoreettiset säteilyintensiteetit, joita verrattiin alussa pienellä paneelilla mitattuihin arvoihin. Suurien paneelien oikosulkuvirta on STC-olosuhteissa 8,7 A, ja rinnankytkettyjen paneelien oikosulkuvirta on noin 17,4 A. Tulokset on esitetty taulukossa 14.

TAULUKKO 14. Paneelien oikosulkuvirtojen perusteella lasketut säteilyintensiteetit

Paneeli		240 Wp	30 Wp
Etäisyys/m	Isc/A	G/ W/m ²	G/ W/m ³
0,6	0,504	28,99	70
1	0,457	26,26	35
1,8	0,268	15,40	12,75
1 valaisin	0,300	17,24	35

Eri paneeleilla mitattujen oikosulkuvirtojen perusteella lasketut säteilyintensiteetit poikkeavat toisistaan noin 2,6 - 41 W/m². Erot selittyvät paneelien ominaisuuksilla ja pinta-aloilla. Valaisimen valokeilassa säteilyintensiteetti ei jakaudu täysin tasaisesti, eikä valokeila välttämättä peitä suuria paneeleita kokonaisuudessaan. Mittaustulos kuvastaakin paneelisiin saapuvaa keskimääräistä säteilyintensiteettiä. Mittaustulokset osoittavat, että säteilyintensiteetin tarkka määrittäminen on vaikeaa ja riippuu mittaustavasta.

Säteilyintensiteetin vaikutusta pystyttiin havainnollistamaan näillä mittauksilla. Tulokset osoittavat, että mittausten menetelmä on oikea ja säteilyintensiteetin vaikutusta voidaan havainnollistaa nykyisilläkin valaisimilla. Valaisimien säteilyintensiteetin lisäämisellä eroja tuloksissa voitaisiin parantaa.

4.3 Lämpötilan vaikutus virta-jännite-käyrään

Lämpötilalla on säteilyintensiteettiä vähäisempi vaikutus virta-jännite-käyrään. Taulukossa 1 on esitetty paneelien tekniset tiedot, joiden mukaan paneelien tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin TC_{Uoc} on -0,35 %/K ja oikosulkuvirran lämpötilakerroin TC_{Isc} on +0,03 %/K. Lämpötilakertoimilla tarkoitetaan tyhjäkäyntijännitteen ja oikosulkuvirran

suhteellista muutosta lämpötilan noustessa yhden asteen. Näistä arvoista voitiin etukäteen päätellä, että lämpötilaeron on oltava suuri aiheuttaakseen merkittäviä muutoksia virtajännite-käyrään. Paneelien odotettiin lämpenevän valaisimien avulla riittävästi eron havainnollistamiseksi.

Paneelien lämpötilaa mitattiin sekä infrapunamittarilla, että yleismittariin kytketyllä termoparilla, joka kiinnitettiin paneelin pintaan teipillä. Molemmilla mittareilla saatiin pääsääntöisesti samat tulokset, mutta infrapunamittari saattoi häiriintyä esimerkiksi heijastuksista. Termoparin käyttö lämpötilan mittaukseen osoittautui huomattavasti luotettavammaksi vaihtoehdoksi (Kuva 11). On huomioitava, että paneelin pinnalla on eristävä lasi, joten itse kennojen lämpötila ei voitu mitata tällä tavalla. Termopari pitäisi pystyä sijoittamaan lasin alle kennojen lämpötilan tarkemman mittaustuloksen saavuttamiseksi.



KUVA 11. Lämpötilan mittaus

Valaisimen säteilyteho on suoraan verrannollinen säteilyintensiteettiin, joten lämpövaikutus jäi paljon odotettua vähäisemmäksi. Valaisimet lämmittävät paneeleita 1 m etäisyydellä noin 2 °C, ja lämpötila nousee erittäin nopeasti noin 24 – 25 asteeseen. Valaisimet syttyvät todella hitaasti, joten niitä ei ollut järkevää sammuttaa mittausten välissä. Valmistajan ilmoittama sytytysaika on 30 sekuntia, mutta pian sammuttamisen jälkeen uudelleen kytkettynä valaisin ei välttämättä syty ollenkaan. Paneelien lämpötilan pitämiseksi mahdollisimman alhaisena, ne peitettiin pahvilla mittausten väliseksi ajaksi ja paljastettiin mahdollisimman lyhyeksi ajaksi virtajännite-käyrän toimintapisteitä mitattaessa (Kuva 12).



KUVA 12. Pahvilla peitetyt valaisimet

Tällä tavalla paneelien lämpötila saatiin pidettyä lähes huoneenlämpötilassa, noin 22,5 °C. Aurinkopaneelien virta ja jännite mitattiin jälleen eri toimintapisteissä. Tulokset on esitetty taulukossa 15.

TAULUKKO 15. Mittaus- ja laskentatulokset

R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,475	0,00
6,25	3,37	0,464	1,56
12,5	6,155	0,455	2,80
25	11,305	0,436	4,92
50	21,2	0,398	8,45
60	23,82	0,377	8,97
75	28,75	0,360	10,35
100	36,8	0,343	12,62
120	39,79	0,317	12,61
150	44,96	0,283	12,72
162,5	45,74	0,267	12,19
200	47,76	0,215	10,24
240	48,178	0,202	9,72
480	49,81	0,103	5,15
960	50,4	0,052	2,60
1920	50,67	0,026	1,32
2880	50,716	0,017	0,88
∞	50,999	0	0

Tulokset eroavat hyvin vähäisesti lähtötilanteesta mitatuista arvoista, mutta virta-jännitekäyrän muutos on kuitenkin havaittavissa kuviossa 15, jossa on samaan koordinaatistoon piirretty lähtötilanteen käyrä, jolloin lämpötila oli hieman suurempi. Lämpötilan lasku aiheuttaa lievän nousun tyhjäkäyntijännitteessä, mutta oikosulkuvirta pysyy likimain samassa arvossa. Lämpötilakertoimen mukainen teoreettinen jännitteen muutos laskettiin yhtälöllä 9.

$$\begin{aligned} U_{oc(22,4^{\circ}C)} &= U_{oc(24,6^{\circ}C)} + U_{oc(24,6^{\circ}C)} \cdot TC_{Uoc} \cdot (\Delta T) \\ &= 50,33 \text{ V} + 50,33 \text{ V} \cdot (-0,0035) \cdot (22,4^{\circ}C - 24,6^{\circ}C) \\ &\approx 50,72 \text{ V} \end{aligned} \quad (9)$$

, jossa $U_{oc(22,4^{\circ}C)}$ on paneelien oikosulkujännite lämpötilassa $22,4^{\circ}C$, $U_{oc(24,6^{\circ}C)}$ on paneelien mitattu oikosulkujännite lämpötilassa $24,6^{\circ}C$, TC_{Uoc} on tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin ja ΔT on lämpötilan muutos.

Tyhjäkäyntijännitteen muutos on hyvin pieni niin laskennallisesti kuin mitattunakin. Mitattu tyhjäkäyntijännite eroaa lasketusta vain vähäisesti.

Koska paneelien lämpötila ei noussut merkittävästi valaisimien vaikutuksesta, niitä piti lämmittää. Laboratoriossa ei ollut mittaushetkellä tarkoitukseen sopivaa lämmityslaitetta, joten paneeleja yritettiin lämmittää vastuslaitteistoilla. Paneelien alapuolelle asetettiin kolme vastuslaitteistoa, joihin kytkettiin 230 V jännite 60Ω resistanssin yli (Kuva 13).



KUVA 13. Paneelien lämmittäminen vastuslaitteistoilla

Vastuslaitteistojen tiedettiin kuumenevan tällaisella kuormituksella, ja paneelin lämpötila saatiin niillä nostettua 30,8 °C:een. Paneelien lämmittäminen tällä tavalla ei ole tarkoituksenmukaista, joten suositeltavaa olisi käyttää esimerkiksi tehokasta lämpöpuhallinta. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 16.

TAULUKKO 16. Mittaus- ja laskentatulokset

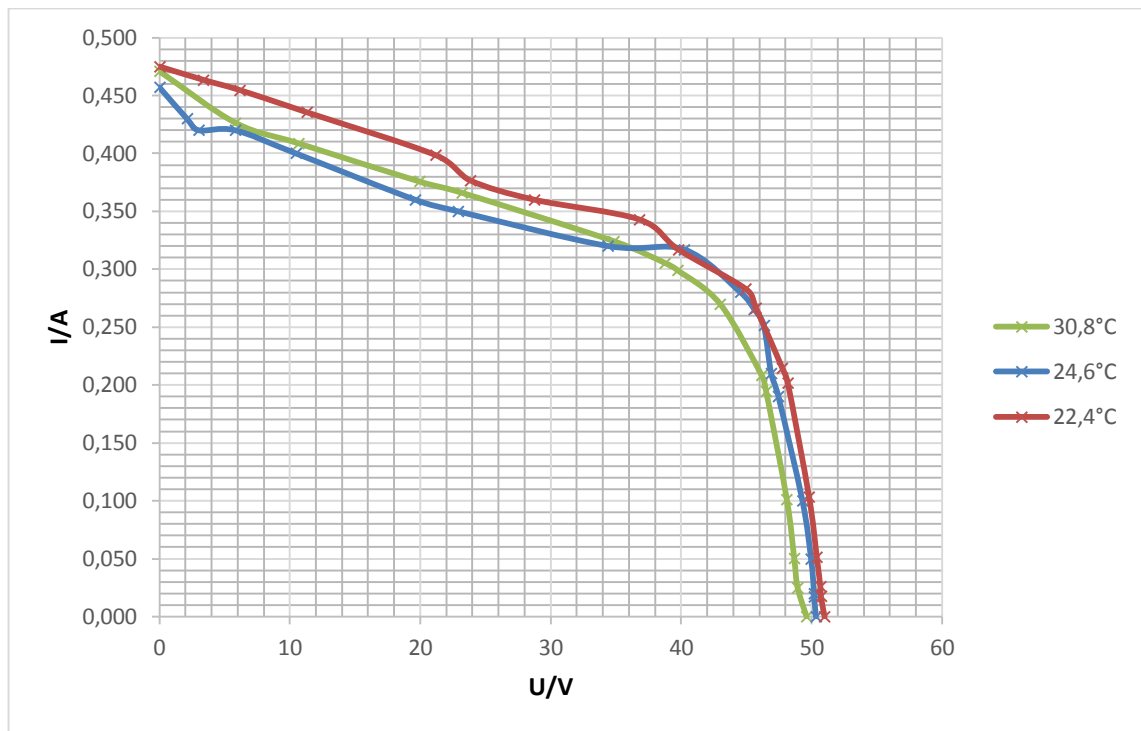
R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,471	0
12,5	5,836	0,426	2,49
25	10,688	0,409	4,37
50	19,932	0,376	7,49
60	23,188	0,366	8,49
100	34,83	0,324	11,29
120	38,77	0,305	11,84
125	39,74	0,299	11,88
150	42,99	0,270	11,61
200	46,183	0,208	9,62
240	46,518	0,195	9,05
480	48,1	0,101	4,88
960	48,67	0,050	2,44
1920	48,928	0,025	1,23
∞	49,62	0	0

Tyhjäkäyntijännite pienenee lämpötilan noustessa, mutta oikosulkuvirrassa ei tapahdu merkittävää muutosta. Lämpötilakertoimen mukainen teoreettinen jännitteen muutos laskettiin yhtälöllä

$$\begin{aligned}
 U_{oc(30,8^{\circ}C)} &= U_{oc(24,6^{\circ}C)} + U_{oc(24,6^{\circ}C)} \cdot TC_{Uoc} \cdot (\Delta T) \\
 &= 50,33 \text{ V} + 50,33 \text{ V} \cdot (-0,0035) \cdot (30,8^{\circ}C - 24,6^{\circ}C) \\
 &\approx 49,24 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

, jossa $U_{oc(30,8^{\circ}C)}$ on paneelien mitattu oikosulkujännite lämpötilassa 30,8 °C, $U_{oc(24,6^{\circ}C)}$ on paneelien mitattu oikosulkujännite lämpötilassa 24,6 °C, TC_{Uoc} on tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin ja ΔT on lämpötilan muutos.

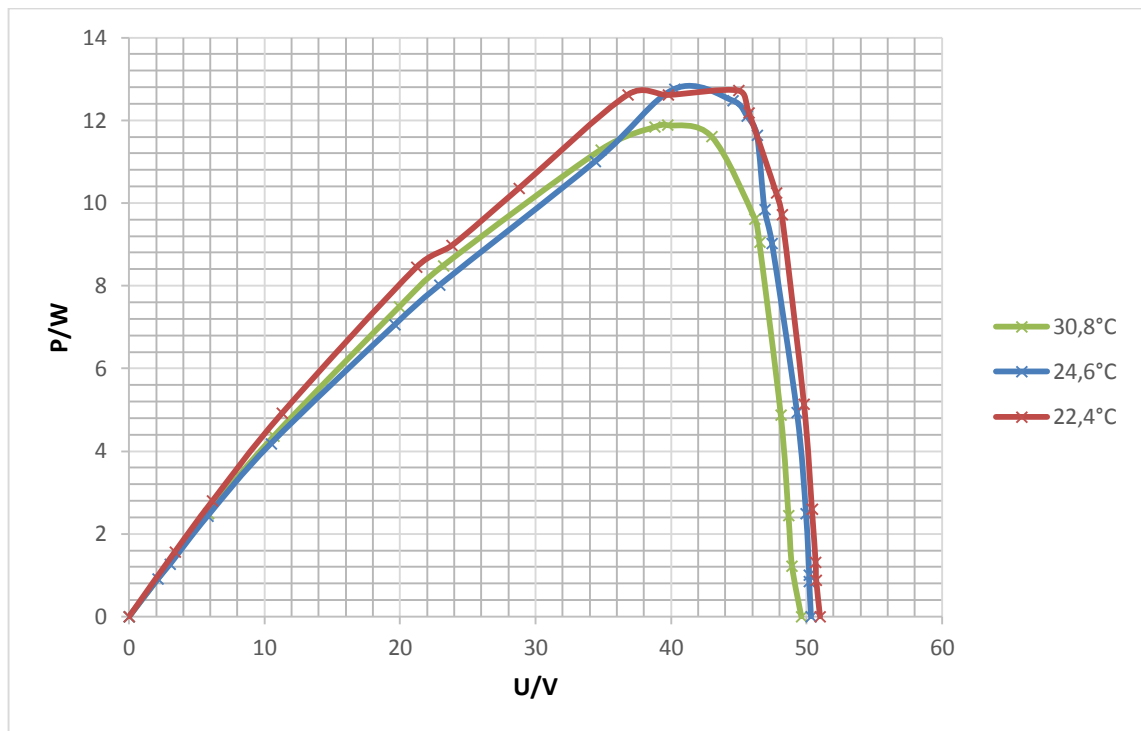
Mitattu tyhjäkäyntijännite vastaa melko tarkasti laskettua arvoa. Virta-jännite-käyrät eri lämpötiloissa piirrettiin samaan koordinaatistoon kuvioon 15.



KUVIO 15. Lämpötilan vaikutus virta-jännite-käyrään

Kuvaajasta nähdään, että lämpötilan nousu alentaa tyhjäkäyntijännitettä. Virrassa ei näin pienillä lämpötilaeroilla tapahdu merkittävää muutosta. Teoriassa lämpötilan nousun pitäisi kasvattaa hieman oikosulkuvirtaa, mutta näistä mittaustuloksista ilmiötä ei voi havaita. Lämpötiloissa 22,4 °C ja 24,6 °C käyrät leikkaavat toisensa teorian mukaisesti, mutta lämpötilassa 30,8 °C virta oli hieman korkeampi koko käyrällä. Oikosulkuvirta pysyi kuitenkin lähes samana kaikissa lämpötiloissa.

Mittaustuloksien pohjalta lasketulle teholla piirrettiin käyrät kuvioon 16.



KUVIO 16. Lämpötilan vaikutus teho-jännite-käyrään

Lämpötilan nousu johtaa paneelien tehon laskemiseen. Lämpötilassa 22,4 °C mitattiin maksimiteho 12,61 W ja lämpötilassa 30,8 °C maksimiteho 11,88 W. Ero on pieni, mutta ilmiö on havaittavissa tehon kuvaajasta.

Tässä mittauksessa ei onnistuttu toivotulla tavalla, koska lämpötilaeroa eri mittausten välillä ei saatu kasvatettua kovin suureksi. Paneeleita pitäisi pystyä lämmittämään enemmän mittaustulosten parantamiseksi. Tehokkaammilla valaisimilla ja ulkoisella lämmityslaitteella lämpötila todennäköisesti nousisi jonkin verran korkeammaksi.

4.4 Säteilyn tulokulman vaikutus virta-jännite-käyrään

Tässä mittauksessa tutkittiin valaisukulman vaikutusta paneelin virta-jännite-käyrään. Valaisimet asetettiin noin 45° kulmaan paneelisiin nähden 1m säteelle paneelien keskipisteestä. Vinosti paneeliin saapuvan säteilyn kohtisuora intensiteetti laskettiin yhtälöllä

$$G_{\alpha} = G \cdot \cos(\alpha) = 35 \text{ W/m}^2 \cdot \cos(45^{\circ}) \approx 24,7 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

, jossa G on valaisimen säteilyintensiteetti 1 m etäisyydellä ja α on paneelin normaalin ja valonsäteiden välinen kulma.

Paneelien teoreettinen oikosulkuvirta laskettiin yhtälön 3 mukaisesti.

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot I_{sc(STC)} \cdot 2 = \frac{24,7 \frac{W}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} \cdot 8,7 \text{ A} \cdot 2 \approx 0,43 \text{ A} \quad (3)$$

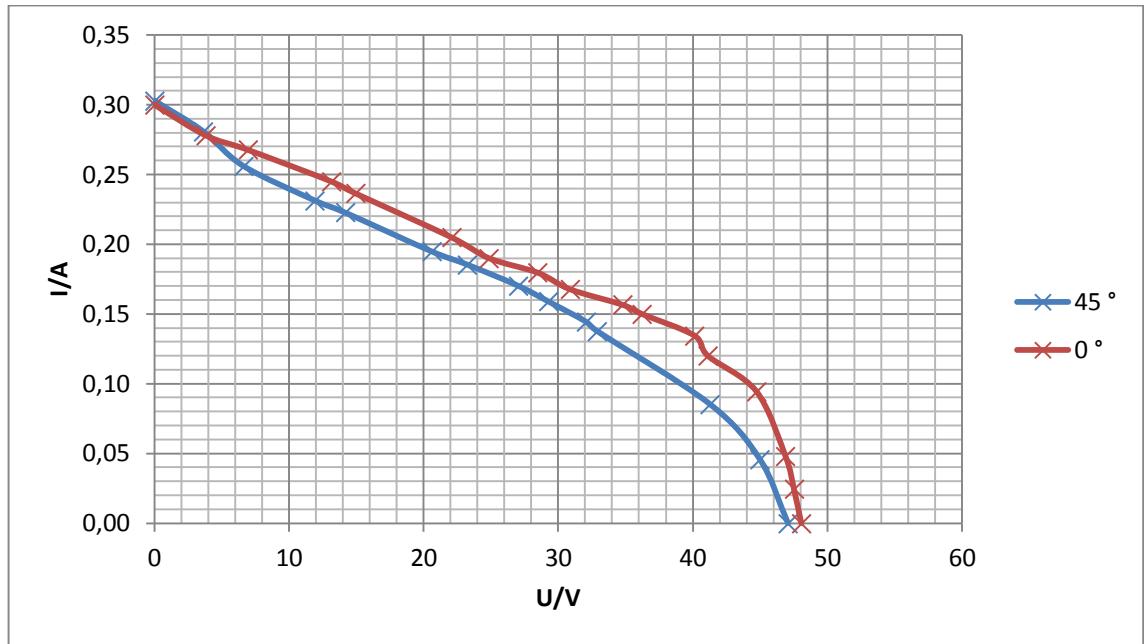
Paneelien virta ja jännite mitattiin eri kuormituksilla sekä oikosulku- ja tyhjäkäyntitilanteissa. Paneelin teho laskettiin kussakin toimintapisteessä. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 17.

TAULUKKO 17. Mittaus- ja laskentatulokset

R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,303	0,00
12,5	3,62	0,281	1,02
25	6,61	0,256	1,69
50	11,91	0,231	2,76
60	14,17	0,223	3,16
100	20,61	0,195	4,01
120	23,25	0,185	4,31
150	27,03	0,170	4,60
175	29,26	0,159	4,65
200	32,08	0,144	4,63
240	32,89	0,138	4,53
480	41,27	0,085	3,52
960	44,99	0,046	2,06
∞	47,07	0	0

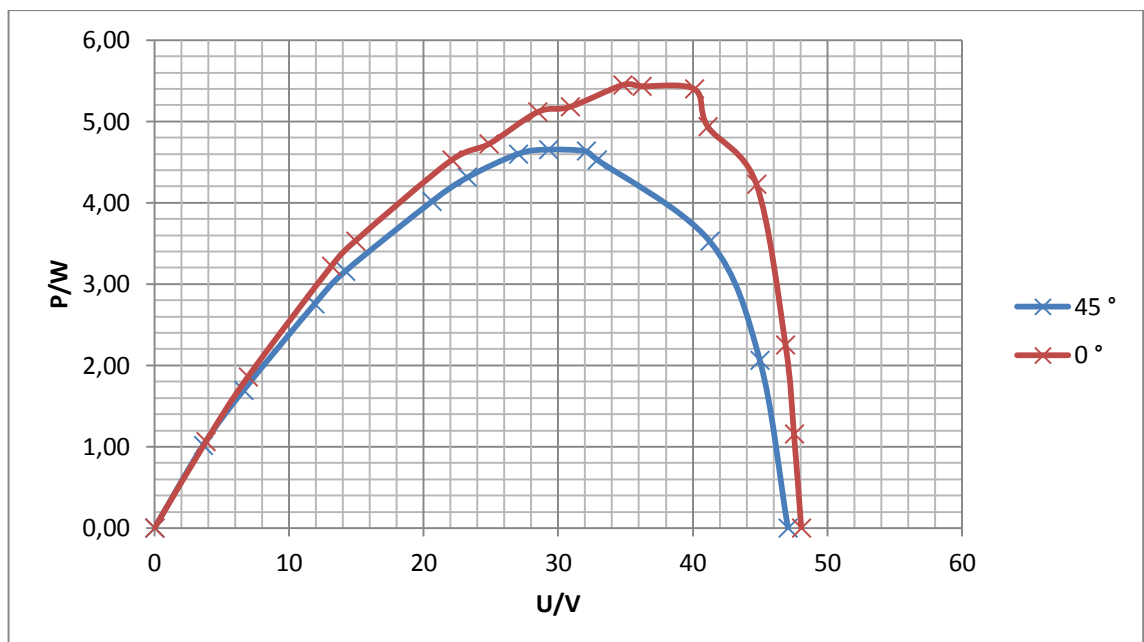
Mitattu oikosulkuvirta eroaa lasketusta arvosta noin 0,1 A. Kuten aiemmin todettiin, säteilyintensiteetin tarkka määrittäminen on vaikeaa, joten laskettu arvo oikosulkuvirralla ei ole kovin tarkka. Vähäisen säteilyintensiteetin vuoksi suhteellinen virhe on suuri.

Mittaus- ja laskentatulosten perusteella piirrettiin paneelien virta-jännite-käyrä samaan koordinaatistoon kohtisuoraan 1 m etäisyydellä mitatun käyrän kanssa (Kuvio 17).



KUVIO 17. Säteilyn tulokulman vaikutus virta-jännite-käyrään

Vinosti paneeliin saapuva säteily alentaa paneeliin saapuvaa säteilyintensiteettiä, ja siten hieman tyhjäkäyntijännitettä ja virtaa lähes koko käyrällä. Oikosulkuvirta pysyi likimain samana. Lasketun tehon kuvaajat piirrettiin samaan koordinaatistoon kuvioon 18.



KUVIO 18. Säteilyn tulokulman vaikutus teho-jännite-käyrään

Vinosti paneeliin saapuva säteily alentaa luonnollisesti myös paneelin tehoa. Tästä syystä aurinkopaneelit on järkevää asentaa maantieteellisestä sijainnista ja käyttötavasta riippuen sopivaan kulmaan tehon tuotannon maksimoimiseksi. Mittaustulokset osoittavat, että säteilyn tulisi saapua mahdollisimman kohtisuoraan paneeleihin tehon maksimoimiseksi.

4.5 Osittaisen varjostuksen vaikutus virta-jännite-käyrään

Valaisimet sijoitettiin jälleen kohtisuoraan 1 m etäisyydelle paneeleista ja toisesta paneelistä peitettiin puolet rullaverholla (Kuva 14).



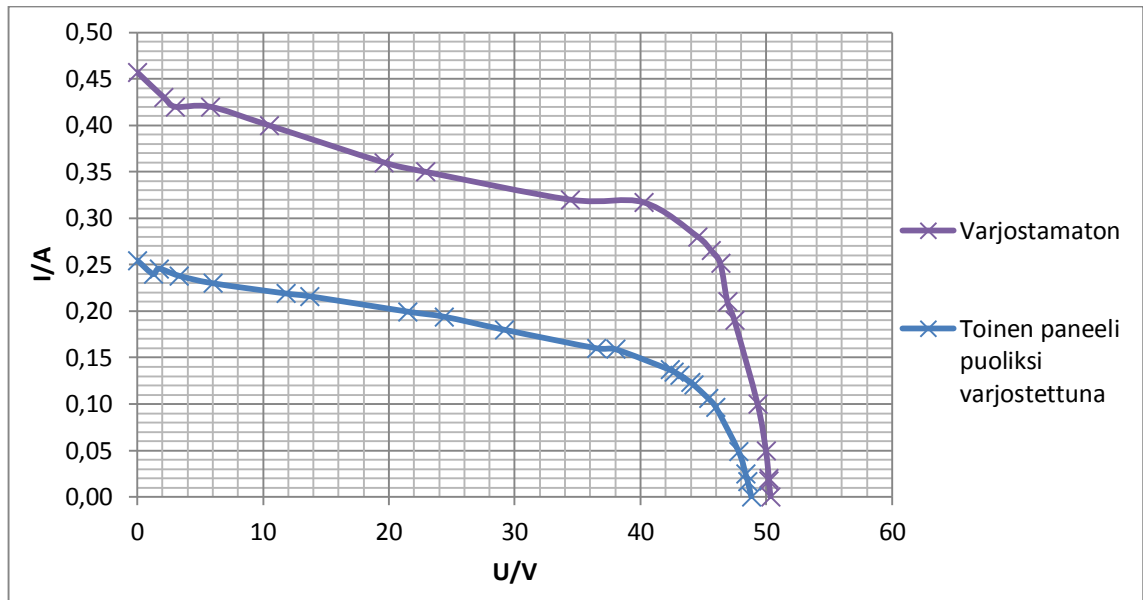
KUVA 14. Toinen paneeli puoliksi varjostettuna

Näin ollen säteilyintensiteetti ei muuttunut ensimmäisestä mittauksesta. Paneelien lämpötila, virta ja jännite mitattiin eri kuormilla. Paneelien mitattu lämpötila tässä mittauksessa oli 24,8 °C. Paneelien teho laskettiin kussakin pisteessä virran ja jännitteen tulona. Mittauskytkentä oli edellisen mittauksen kaltainen (Kuvio 8). Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Mittaus- ja laskentatulokset

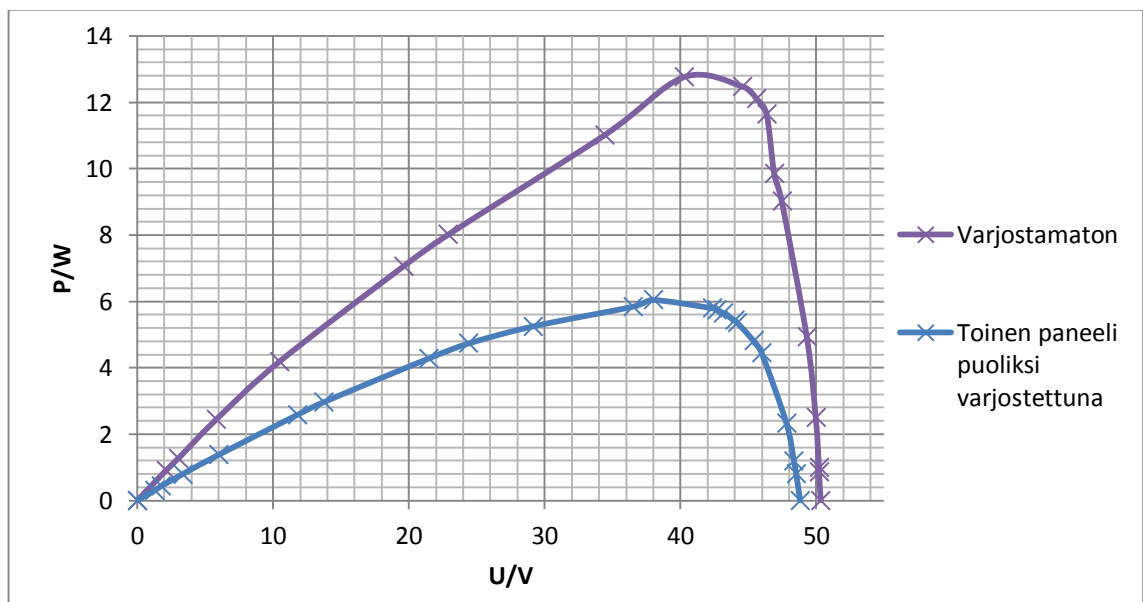
R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,255	0
4,17	1,25	0,240	0,30
6,25	1,74	0,246	0,43
12,5	3,33	0,238	0,79
25	6,00	0,230	1,38
50	11,79	0,219	2,58
60	13,71	0,216	2,96
100	21,47	0,200	4,28
120	24,38	0,194	4,73
150	29,16	0,180	5,25
162,5	23,67	0,190	4,50
175	25,88	0,190	4,92
200	36,51	0,160	5,84
225	38,64	0,150	5,80
240	38,00	0,159	6,04
246,25	42,33	0,137	5,79
252,5	42,67	0,135	5,75
265	43,13	0,131	5,65
290	43,97	0,124	5,43
300	41,99	0,130	5,46
360	44,20	0,121	5,35
420	45,39	0,106	4,81
480	45,98	0,097	4,44
960	47,80	0,049	2,33
1920	48,35	0,025	1,19
2880	48,52	0,017	0,81
∞	48,81	0	0

Taulukon mittaustuloksien perusteella piirrettiin varjostamattoman ja osittain varjostetun paneelin virta-jännite-käyrät (Kuvio 19). Kuvaajasta nähtiin maksimitehopisteen alue, jonka lähelle lisättiin mittauspisteitä.



KUVIO 19. Virta-jännite-käyrät varjostamattomalla paneelilla ja toinen paneeli puoliksi varjostettuna

Käyrämuoto on edellisen varjostamattoman paneelin mittaustulosten kaltainen, mutta paneelin virran havaittiin pudonneen lähes puoleen koko mittausalueella varjostamattomiin paneelisiin verrattuna. Oikosulkuvirta on muiden pisteiden tavoin puolittunut. Tyhjäkäyntijännite on laskenut vain hyvin vähäisesti varjostuksen seurauksena. Mittaustulokista piirrettiin myös kuvaaja tehosta jännitteen funktiona (Kuvio 20).



KUVIO 20. Teho-jännite-käyrät varjostamattomalla paneelilla ja toinen paneeli puoliksi varjostettuna

Tehon kuvaajasta pystyttiin myös tarkastelemaan maksimitehopisteen sijaintia ja siten lisäämään mittauspisteitä. Kuvaajasta nähdään, että myös paneelien teho on pudonnut noin puoleen lähtötilanteeseen verrattuna. Suurin teho saavutettiin kilpiarvojen mukaan lasketulla 225Ω kuormalla ja maksimitehopiste on saavutettavissa arviolta $200 - 250 \Omega$ kuormituksella. Suurin mitattu teho oli noin 6 W.

Seuraavaksi lisättiin varjostusta ja molemmista paneeleista peitettiin puolet. Valaisimet pidettiin edelleen 1 m etäisyydellä paneeleista, joten säteilyintensiteettikään ei muuttunut. Mittauskytkentä oli edellisten mittauksien kaltainen (Kuva 15).



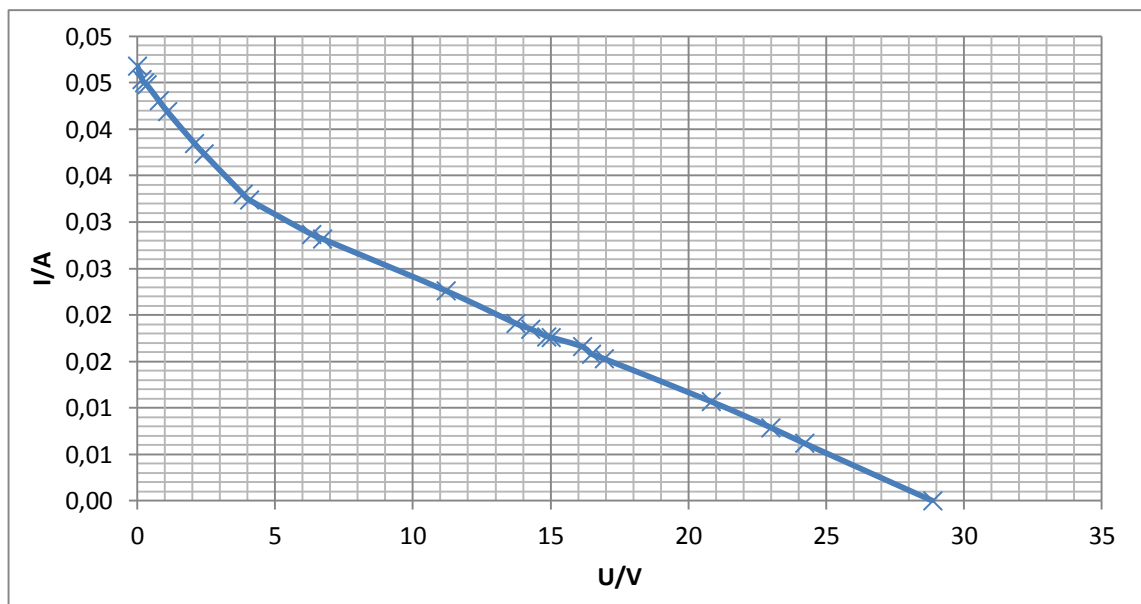
KUVA 15. Mittaustilanne, molemmat paneelit puoliksi varjostettuna

Paneelien lämpötila, virta ja jännite mitattiin eri kuormilla. Paneelin mitattu lämpötila oli $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Paneelien teho laskettiin kussakin pisteessä virran ja jännitteen tulona. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Mittaus- ja laskentatulokset

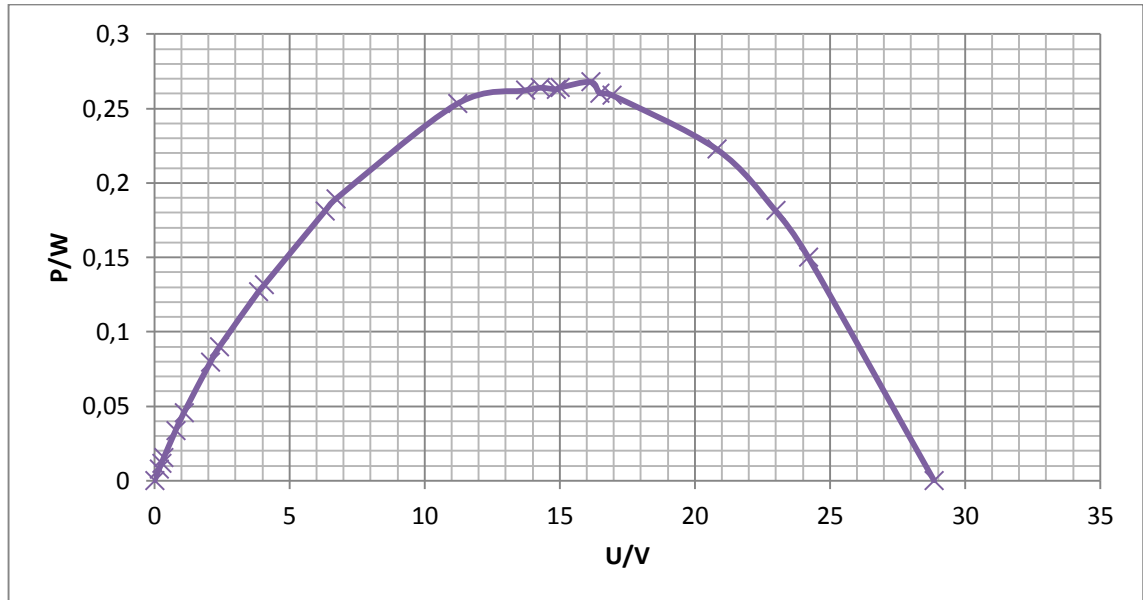
R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,0468	0
4	0,17	0,0454	0,008
5	0,26	0,0450	0,012
6,25	0,34	0,0448	0,015
12,5	0,78	0,0431	0,034
25	1,09	0,0419	0,046
50	2,07	0,0385	0,080
60	2,41	0,0374	0,090
100	3,84	0,0330	0,127
120	4,06	0,0324	0,131
200	6,31	0,0287	0,181
240	6,71	0,0282	0,189
480	11,20	0,0226	0,253
720	13,73	0,0191	0,262
780	14,27	0,0185	0,264
840	14,86	0,0177	0,263
852,5	15,00	0,0176	0,264
960	16,14	0,0166	0,268
1020	16,48	0,0158	0,260
1080	16,93	0,0153	0,259
1920	20,81	0,0107	0,223
2880	22,98	0,0079	0,182
3840	24,20	0,0062	0,150
∞	28,86	0	0

Taulukon mittaustuloksien perusteella piirrettiin olosuhteiden mukainen virta-jännite-käyrä (kuvio 21).



KUVIO 21. Virta jännitteen funktiona molemmat paneelit puoliksi varjostettuna

Käyrämuoto muuttui merkittävästi, virta laskee lähes lineaarisesti jännitteen noustessa. Paneelin oikosulkuvirta romahti noin kymmenesosaan verrattuna varjostamattomiin paneeleihin. Myös tyhjäkäyntijännite pieneni voimakkaasti varjostuksen seurauksena. Kuvaajasta ei voinut havaita maksimitehopisteen aluetta. Mittaustuloksista piirrettiin kuvaaja tehosta jännitteen funktiona (Kuvio 22).



KUVIO 22. Teho jännitteen funktiona molemmat paneelit puoliksi varjostettuna

Tehon kuvaajasta kuitenkin pystyttiin havaitsemaan maksimitehopisteen sijainti ja siten lisäämään mittauspisteitä. Kuvaajasta nähdään, että myös paneelien teho on romahtanut noin kahteen prosenttiin lähtötilanteeseen verrattuna. Suurin teho, suuruudeltaan noin 0,26 W, saavutettiin kilpiarvoltaan 960 Ω kuormalla ja maksimitehopiste on saavutettavissa arviolta 720 – 1080 Ω kuormituksella.

Varjostuksen merkitystä paneelien toimintaan oli tarkoitus tutkia tarkemmin, mutta kii-
reisen aikataulun vuoksi mittaukset jäivät suppeiksi. Mittaustuloksista havaittiin, että toisen paneelin varjostaminen ei estänyt toista toimimasta. Puolittain varjostettu paneeli tuottaa noin puolet alempaa jännitettä ja virta on pieni. Kun paneelit on kytketty rinnan, varjostamaton paneeli toimii edelleen ja jännite laskee vain vähäisesti. Virta laskee noin puoleen verrattuna lähtötilanteeseen. Kun toinenkin paneeli peitetään puoliksi, jännite laskee noin puoleen, ja virta romahtaa murto-osaan varjostamattomiin paneeleihin verrattuna.

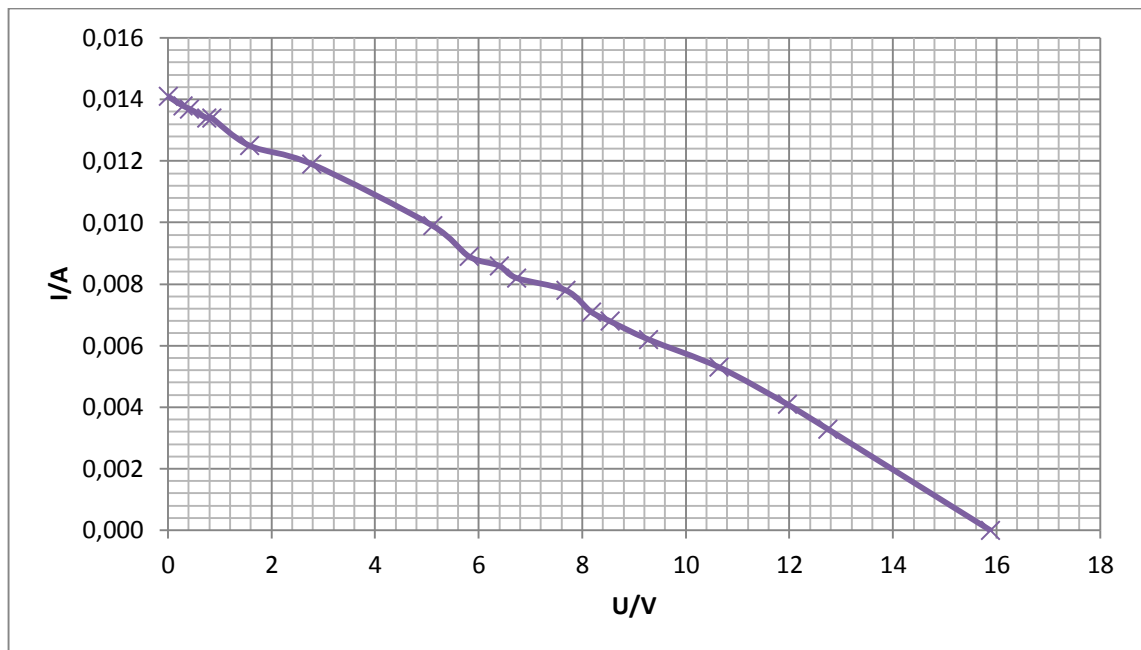
4.6 Virta-jännite-käyrä loisteputkivalaistuksessa

Vastaavat mittaukset suoritettiin ilman plasmavalaisimia, pelkässä sähkölaboratorion loisteputkivalaistuksessa. Tämän mittauksen tarkoitus oli ainoastaan havainnollistaa paneelien reagointia heikkotehoiseen valaistukseen. Paneelien napojen välille muodostuu jännite jopa loisteputkivalaistuksessa. Pienemmän paneelin mitattu oikosulkuvirta loisteputkivalaistuksessa oli 0,002 A, jolloin yhtälöllä 3 laskettu säteilyintensiteetti on 1,0 W/m². Paneelien virta ja jännite mitattiin eri kuormituksilla sekä oikosulku- ja tyhjäkäyntitilanteissa. Paneelin teho laskettiin kussakin toimintapisteessä. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 18.

TAULUKKO 18. Mittaus- ja laskentatulokset

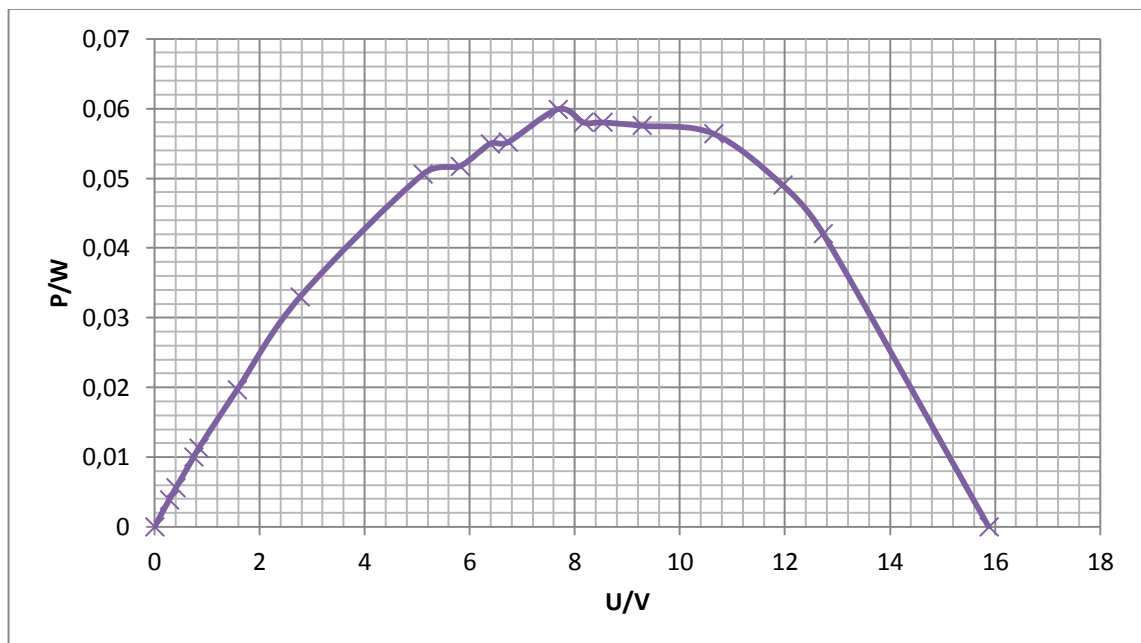
R/ Ω	U/V	I/A	P/W
0	0	0,0141	0
12,5	0,28	0,0138	0,00
25	0,41	0,0137	0,01
50	0,75	0,0134	0,01
60	0,84	0,0134	0,01
120	1,57	0,0125	0,02
240	2,77	0,0119	0,03
480	5,11	0,0099	0,05
600	5,81	0,0089	0,05
720	6,39	0,0086	0,05
780	6,73	0,0082	0,06
960	7,68	0,0078	0,06
1080	8,17	0,0071	0,06
1200	8,53	0,0068	0,06
1440	9,28	0,0062	0,06
1920	10,64	0,0053	0,06
2880	11,96	0,0041	0,05
3840	12,73	0,0033	0,04
∞	15,88	0	0

Tyhjäkäyntijännite oli loisteputkivalaistuksessa vain noin 15,9 V ja oikosulkuvirta noin 0,014 A. Tuloksien perusteella piirrettiin virta-jännite-käyrä kuvioon 23.



KUVIO 23. Paneelien virta jännitteen funktiona

Käyrällä virta laskee lähes lineaarisesti jännitteen noustessa, eikä käyrältä voitu määrittää maksimitehopistettä. Tuloksien perusteella piirrettiin kuvaaja paneelien tehosta jännitteen funktiona (Kuvio 24)



KUVIO 24. Paneelien teho jännitteen funktiona

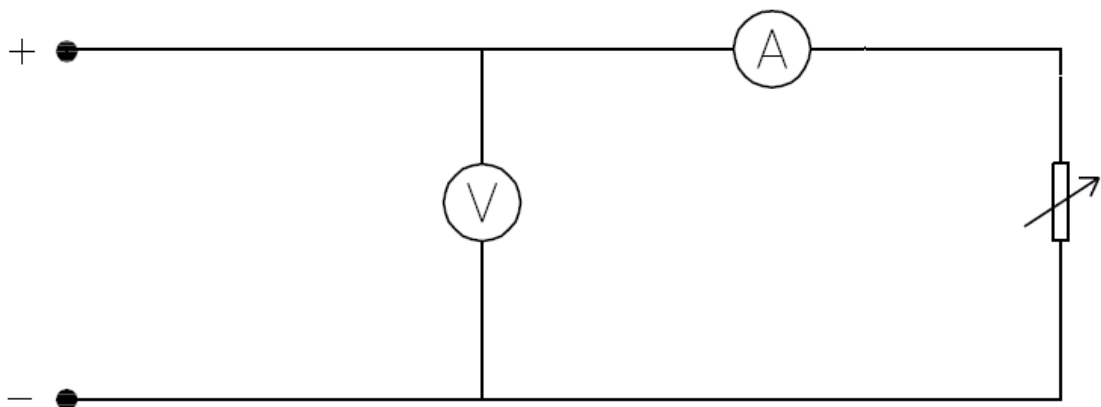
Kuvaajasta pystytään havaitsemaan paneelien maksimitehopisteen alue ja suurin teho saavutettiin kilpiarvoltaan 960Ω kuormalla. Loisteputkivalaistuksessa paneelin suurin

teho oli noin 60 mW. Mittaustulokset osoittavat, että aurinkopaneelien napoihin muodostuu jännite heikossakin valaistuksessa, mutta niiden teho on häviävän pieni.

4.7 Lataussäätimen teho ja hyötysuhde

Tässä mittauksessa tarkasteltiin lataussäätimen toimintaa ja hyötysuhdetta. Lataussäätimelle tuleva paneelien jännite ja virta sekä säätimeltä ulos tuleva jännite ja virta mitattiin eri olosuhteissa. Aiemmat mittaukset osoittivat, että osavarjostustilanteissa saavutettiin suurimmat ja tarkimmat erot virta-jännite-käyrän muodostumisessa. Toisaalta pyrittiin myös havaitsemaan useamman maksimitehopisteen muodostumista ja säätimen kykyä tunnistaa globaali maksimitehopiste. Siksi mittauksessa keskityttiin tutkimaan lataussäätimen toimintaa osavarjostustilanteissa.

Maksimitehon määrittystä varjostamattomalla paneelilla, toinen paneeli puoliksi peitettynä ja molemmat paneelit puoliksi peitettynä, pyrittiin tarkentamaan säätövastuksen avulla. Valitettavasti säätövastus ei ollut täysin portaaton, joten maksimitehopisteen määrittäminen ei tällä tavalla onnistunut täysin tarkasti. Aiempien mittaustulosten pohjalta tiedettiin, millä alueella resistanssia tulisi säätää. Jokaisessa toimintapisteessä vastuksen resistanssi mitattiin yleismittarilla, minkä jälkeen mitattiin kyseisellä kuormituksella paneelien jännite, virta ja lämpötila. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 25.



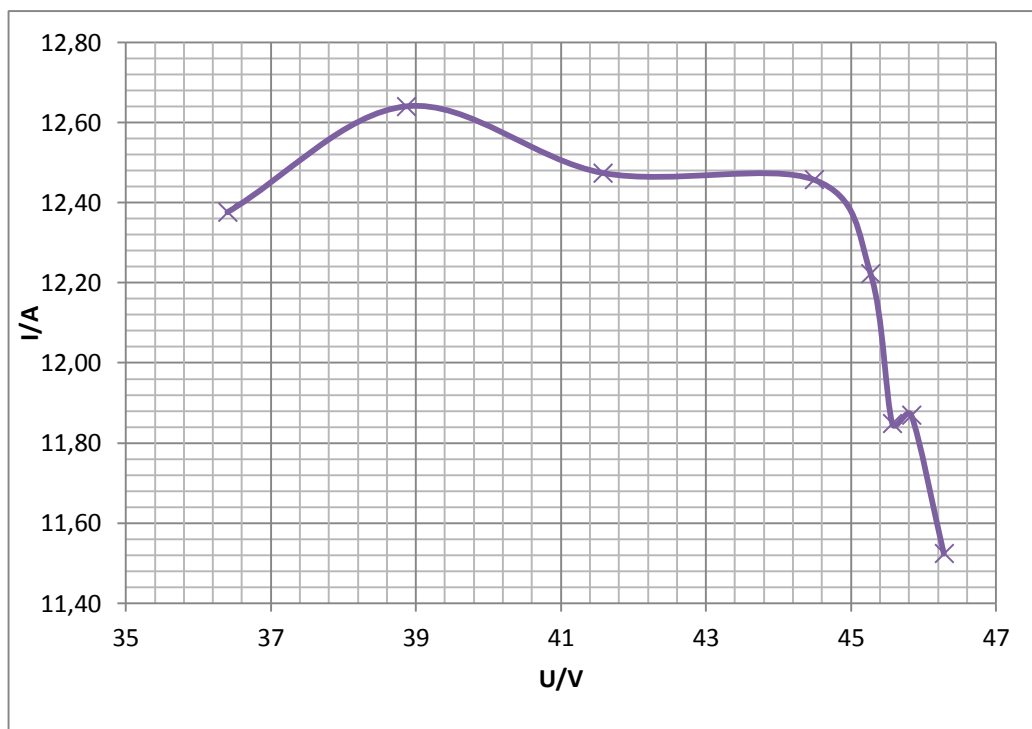
KUVIO 25. Mittauskytkentä

Kytkenä eroaa aiempien mittausten kytkennästä ainoastaan kuorman osalta. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 19.

TAULUKKO 19. Mittaus- ja laskentatulokset

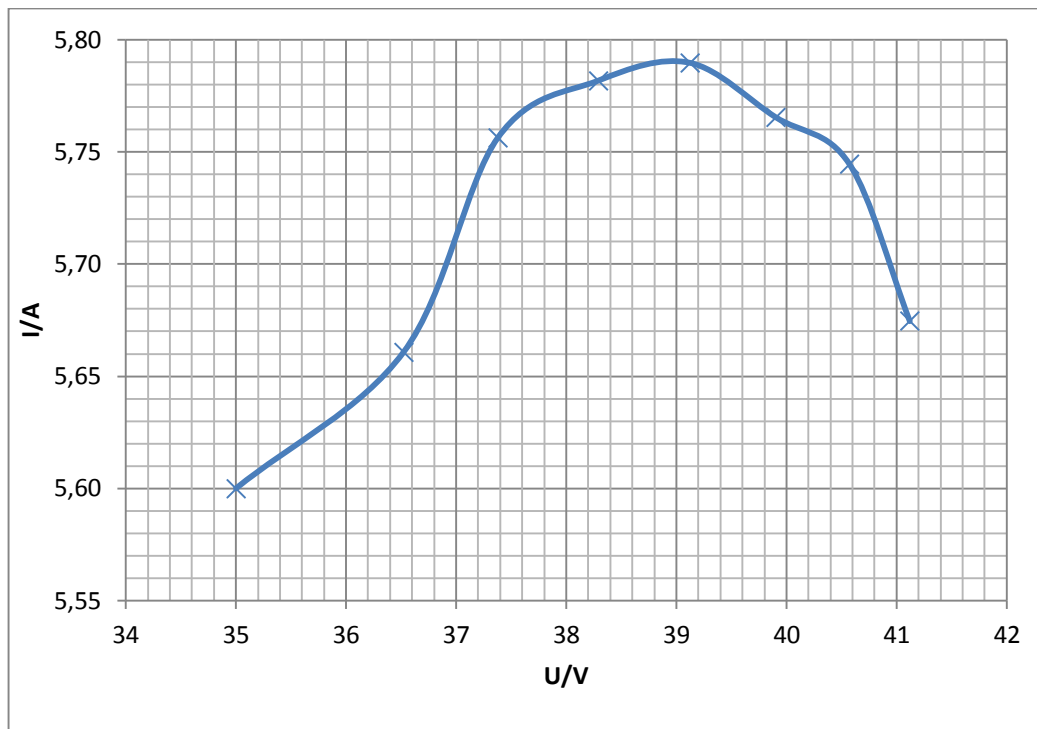
Varjostamaton				1 paneeli 1/2 varjostettuna				Paneelit 1/2 varjostettuna			
R/ Ω	U/V	I/A	P/W	R/ Ω	U/V	I/A	P/W	R/ Ω	U/V	I/A	P/W
109,7	36,4	0,34	12,38	223,9	35,00	0,16	5,60	774	15,7	0,021	0,330
127,56	38,87	0,33	12,64	239,6	36,52	0,155	5,66	789	15,7	0,021	0,335
139,2	41,58	0,3	12,47	250,1	37,38	0,154	5,76	797	15,8	0,021	0,332
163,1	44,49	0,28	12,46	260,02	38,29	0,151	5,78	801	15,9	0,021	0,333
172,1	45,27	0,27	12,22	270,2	39,12	0,148	5,79	815	16,1	0,021	0,332
176,1	45,57	0,26	11,85	282,5	39,90	0,1445	5,77				
183,45	45,83	0,26	11,87	293,4	40,57	0,1416	5,74				
194,67	46,28	0,25	11,52	304,5	41,12	0,138	5,67				

Tällä menetelmällä saatiin tarkempi kuvaaja tehosta jännitteen funktiona maksimitehospisteen alueella. Teho-jännite-käyrien huiput piirrettiin tulosten pohjalta kuvioihin 26-28.



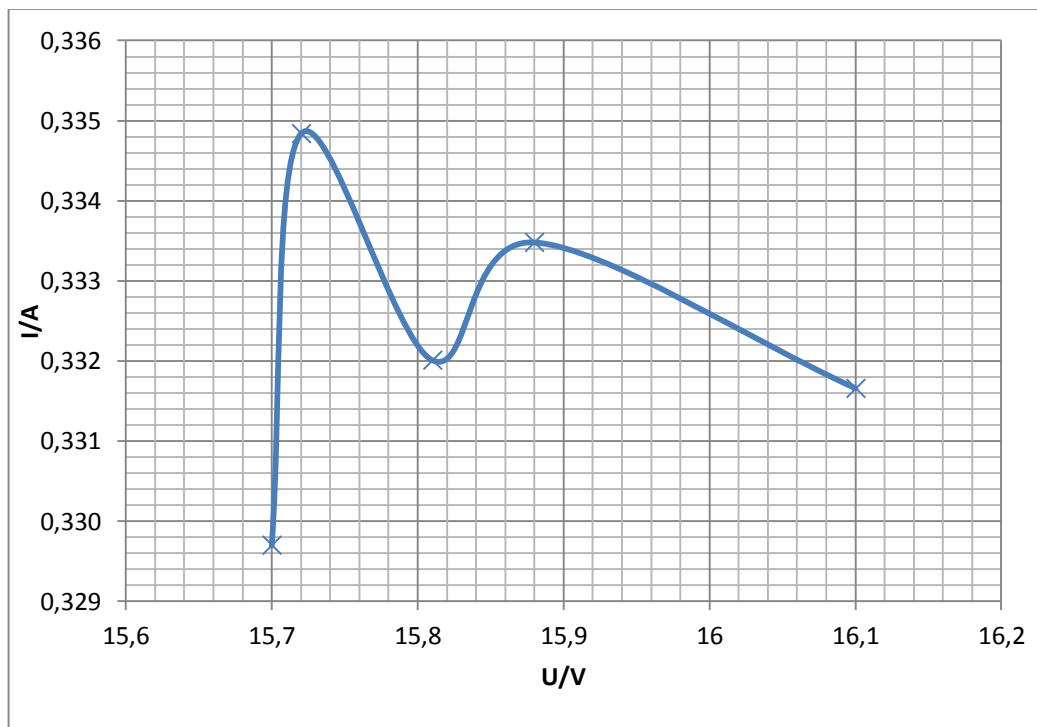
KUVIO 26. Maksimitehospiste varjostamattomilla paneeleilla

Mittauksen mukainen maksimiteho on noin 12,6 W, kun vastuslaitteistolla mitattu maksimiteho oli noin 12,76 W.



KUVIO 27. Maksimitehopiste toinen paneeli puoliksi varjostettuna

Mittauksen mukainen maksimiteho on noin 5,8 W, kun vastuslaitteistolla mitattu maksimiteho oli noin 6,04 W.

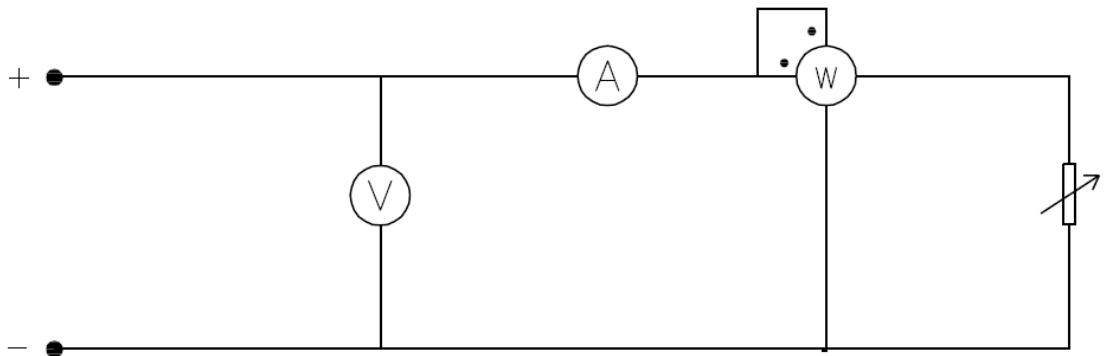


KUVIO 28. Maksimitehopiste molemmat paneelit puoliksi varjostettuina

Mittauksen mukainen maksimiteho on noin 0,33 W, kun vastuslaitteistolla mitattu maksimiteho oli noin 0,26 W.

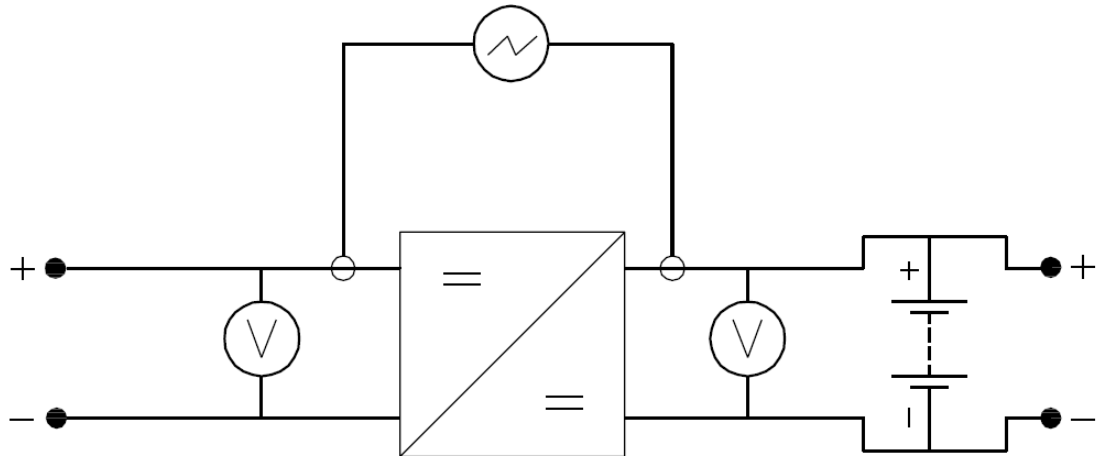
Tämän mittauksen perusteella paneelien maksimiteho on varjostamattomana noin 12,6 W, neljänneksen varjostettuna noin 5,8 W ja puolet varjostettuna noin 0,33 W. Kuvaajista havaitaan myös, että maksimitehopisteestä jännitteen noustessa käyrään muodostuu pieni kuoppa kaikissa mittausolosuhteissa. Tulokset eivät ole tarpeeksi tarkkoja, jotta osavarjostuksen voitaisiin todeta aiheuttavan kahden maksimitehopisteen muodostumista.

Maksimitehopisteen määrittystä voitaisiin vieläkin tarkentaa lisäämällä kytkentään tehomittari, josta voitaisiin silmämääräisesti arvioida resistanssia nostoen, missä pisteessä teho kääntyy laskuun. Valaisimista johtuen teho on pieni, joten analogisen tehomittarin lukemaa on vaikea havaita. Digitaalisella tehomittarilla voitaisiin saada luettua tarkempi arvo. Toisaalta valaisimien vaihtamisella tehokkaampiin saavutettaisiin suurempi sähköteho. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 29.



KUVIO 29. Tehon mittauskytkentä

Lataussäätimen toimintaa tutkittiin varjostaen paneelia kennorivi kerrallaan. Paneelien ja lataussäätimeltä ulostuleva jännite mitattiin yleismittareilla. Paneelien virta ja lataussäätimeltä ulos tuleva virta mitattiin oskilloskoopin virtapihdeillä. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 30.



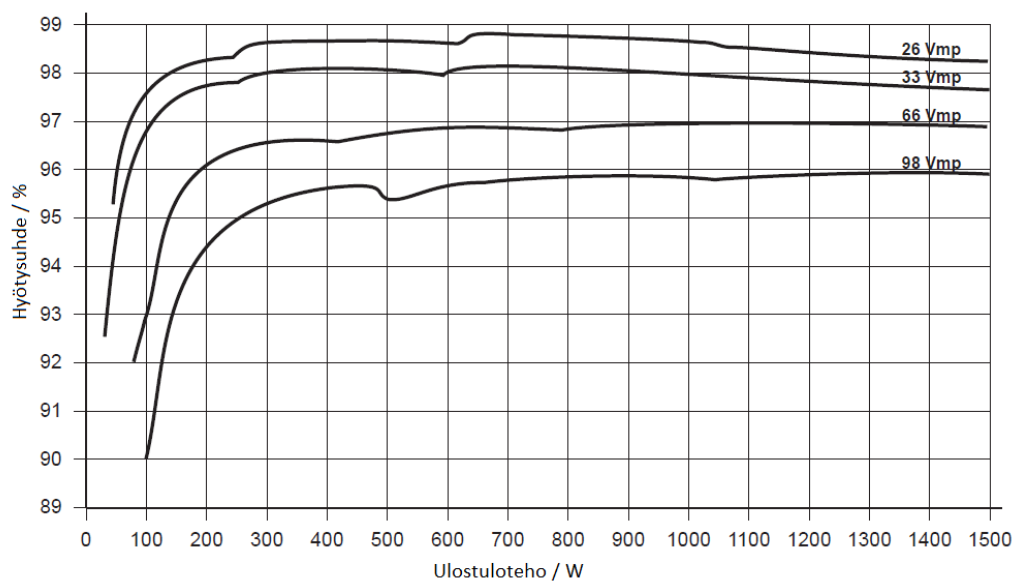
KUVIO 30. Mittauskytkentä

Paneelien teho laskettiin sen virran ja jännitteen tulona. Ulos tulevan virran ja jännitteen perusteella laskettiin lataussäätimen teho. Hyötysuhde laskettiin yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_p}{P_s} \quad (11)$$

, jossa η on lataussäätimen hyötysuhde, P_p on paneelien sähköteho ja P_s on lataussäätimen ulostuloteho.

Valmistajan ilmoittama hyötysuhde ulostulotehon funktiona on esitetty kuviossa 30.



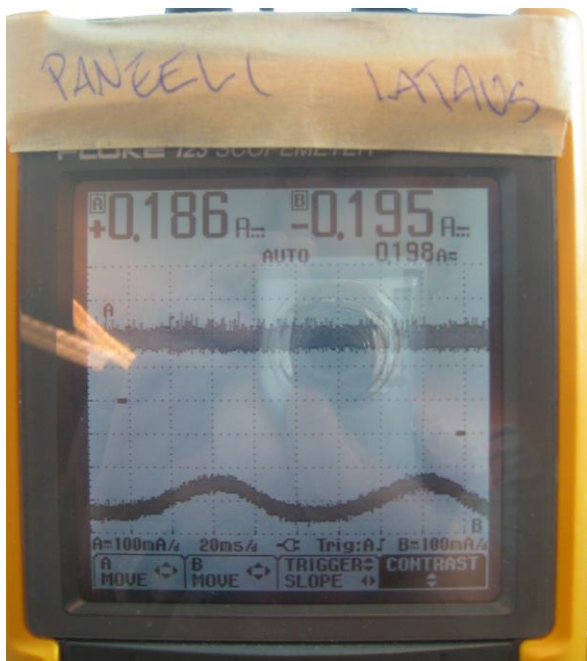
KUVIO 30. TriStar MPPT-45 lataussäätimen hyötysuhde ulostulotehon funktiona (TriStar, muokattu)

Kuviosta nähdään, että lataussäätimen hyötysuhde laskee voimakkaasti alle 100 W tehoilla. Suurin paneeleista saatu sähköteho oli alle 13 W, joten mittaustuloksien ei odotettu onnistuvan toivotulla tavalla. Mittaus- ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 20.

TAULUKKO 20. Mittaus- ja laskentatulokset

	Paneelin virta / A	Paneelin jännite / V	Paneelin teho / W	Säätimen virta / A	Säätimen jännite / V	Säätimen teho / W	Hyöty- suhde / %
Varjostamaton	0,291	40,8	11,87	0,461	22,46	10,35	87,21
1 riviä peitetty	0,267	34,11	9,11	0,273	21,31	5,82	63,88
2 riviä peitetty	0,19	32,1	6,10	0,121	21,13	2,56	41,92
3 riviä peitetty	0,164	36	5,90	0,189	22	4,16	70,43
4 riviä peitetty	0,169	33,5	5,66	0,196	22,1	4,33	76,51
5 riviä peitetty	0,165	32,8	5,41	0,176	22,13	3,89	71,97
6 riviä peitetty	0,162	32,8	5,31	0,176	22,14	3,90	73,33
7 riviä peitetty	0,16	32,4	5,18	0,169	22,18	3,75	72,31

Toisesta paneelistä peitettiin kennorivi kerrallaan, kunnes 7 riviä oli peitetty. Tästä eteenpäin mittaustuloksia ei saatu, koska mitattu virta-arvo oli alle virtapihdin virhemarginaalin. Pihdin nollassa yritettiin säätää mahdollisimman tarkasti, mutta siitä huolimatta mittarin arvo heilahteli $\pm 0,010$ A tyhjänä. Koska virrat ovat laitteistossa hyvin pieniä, johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä on heikko ja mittaustulos epätarkka. Mittaustulokset onnistuivat varjostamattomasta hieman yli puoliksi peitettyyn paneeliin. Suuremmalla varjostuksella virta putosi niin pieneksi, ettei mittaustuloksia voitu enää arvioida. Lataussäädin onnistui jäljittämään maksimitehopisteen melko tarkasti. Lataussäätimen toiminta näyttää perustuvan edellä mainittuun ”Perturb & observe” –menetelmään, sillä oskilloskoopilla tarkasteltu ulostulovirta on aaltoilevaa (Kuva 16). Maksimitehopistettä ei saavuteta, vaan laite siirtyy paneelin virta-jännite-käyrällä edestakaisin maksimitehopisteen ympäristössä.



KUVA 16. Aurinkopaneelien ja lataussäätimen virran aaltomuodot

Kuvassa näkyy säätimen sisään ja ulos tulevat virrat, kun neljä kennoriviä on varjostetuna. Paneeleilta sisään tuleva virta on tasainen ja ulos tuleva virta aaltoilee maksimitehopisteen ympärillä.

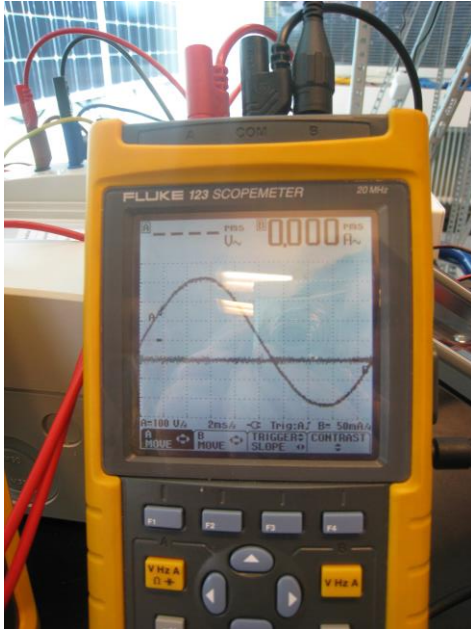
Varjostamattoman paneelin maksimitehoksi saatiin vastuslaitteiston avulla ensimmäisessä mittauksessa 12,76 W ja lataussäätimen paneeleilta ottama teho oli 11,87 W. Puoliksi varjostetun paneelin, eli kuusi kennoriviä peitettynä maksimitehopisteeksi määritettiin noin 5,80 W ja lataussäätimen paneeleilta ottama teho oli 5,31 W. Virtapihdin virhemarginaalin huomioon ottaen tulokset ovat hyvin samankaltaiset.

Lataussäätimen hyötysuhde on näin pienillä tehoilla huomattavasti nimellistä alhaisempi. Kaksi kennoriviä peitettynä hyötysuhde laski alimmilleen. Toisaalta virtamittauksen virhemarginaali saattaa selittää osittain näin alhaisen hyötysuhteen. Tuloksista ei pystytty havaitsemaan kahden maksimitehopisteen muodostumista. Tämä mittaus olisi todennäköisesti onnistunut paremmin suuremmalla paneelien teholla.

4.8 Invertterin ominaisuudet

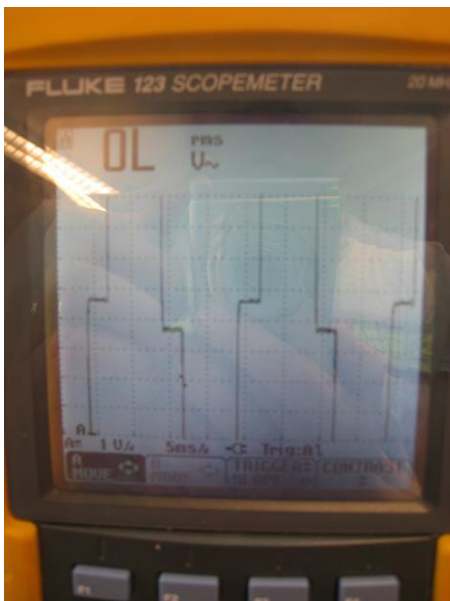
Järjestelmään kuuluu siniaaltoinvertteri, jonka toimintaa tarkasteltiin lyhyesti oskilloskoopin avulla. Invertterin jännite ei ole koskaan täydellisen sinimäistä, joten oskilloskoopilla pyrittiin havainnollistamaan jännitekäyrän muodostumista. Standardi SFS

5264 ohjeistaa, että laitteen käyrämuodon hetkellisarvo saa poiketa maksimissaan 20 % perusaaltosinikäyrän huippuarvosta, jos valmistaja ilmoittaa invertterin tuottavan siniaaltoja. Oskilloskoopin liittäminen tietokoneeseen ei onnistunut, joten kuvakaappausten sijaan oli tyydyttävä kameran kuviin oskilloskoopin näytöltä. Kuvassa 17 on oskilloskoopin kuvaaja noin yhden jakson pituudelta.



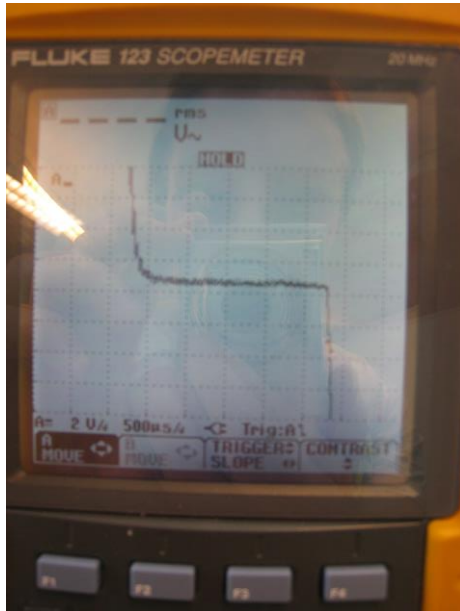
KUVA 17. Sinimäinen jännitteen aaltomuoto

Kuvasta näkyy, että aaltomuoto muistuttaa todella paljon siniä. Kun aaltoa tarkastellaan lähemmin, nähdään käyrän olevan muodoltaan porrasmainen.



KUVA 18. Porrasmainen jännitteen aaltomuoto

Kuvassa 18 on esitetty tarkempi kuvaaja, jossa näkyy kahden positiivisen puolijakson porrastuminen noin 4 V hetkellisessä jännitteessä. Jänniteaaltoa tarkasteltiin vielä lähemmin (Kuva 19).



KUVA 19. Jännitteen porrastuminen negatiivisella puolijaksolla

Kuvassa 19 nähdään, että aallon negatiivisella puolijaksolla invertteri syöttää ulos noin – 3 V jännitettä noin 2 ms ajan(Kuva 19).

Oskilloskoopilla pystyttiin havaitsemaan invertterin tuottaman jännitteen muokattu siniaaltomuoto. Aurinkosähköjärjestelmien käytössä on tärkeää tiedostaa, että kaikki sähkölaitteet eivät välttämättä toimi oikein epäsinimäisellä jännitteellä. Esimerkiksi elektroniset laitteet saattavat vaurioitua tai ainakin niiden käyttöikä saattaa lyhentyä epäsinimäisen käyttöjännitteen vaikutuksesta.

5 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Greenlab- aurinkosähköjärjestelmä on nykyisessä muodossaan monilta osin toimiva kokonaisuus, mutta tämän työn mittauksien yhteydessä havaittiin useita kehityskohteita, joita muuttamalla voitaisiin parantaa itse mittauksien sujuvuutta sekä mittaustuloksien tarkkuutta ja luotettavuutta.

5.1 Valaisimet

Suurimman ongelman mittauksissa aiheuttivat valaisimet. Valaisimien tuottama säteilyintensiteetti oli merkittävästi odotettua heikompi. Ensiksi olisi syytä tarkastaa nykyiset valaisimet, joiden suorituskyky on saattanut heikentyä oltuaan pitkän ajanjakson käyttämättöminä. Valaisimien huolto saattaisi vaikuttaa olennaisesti niiden tuottamaan säteilytehoon ja -intensiteettiin. Säteilyintensiteetin kasvattamiseksi valaisimia tulisi lisätä tai jopa vaihtaa ne kokonaan toisen tyyppiin.

Aurinkopaneelien testauslaboratorioissa käytetään yleensä suuria kammioita, joissa on paljon valaisimia lähietäisyydellä tasaisen 1000 W/m^2 säteilyintensiteetin saavuttamiseksi. Aurinkokennojen testauslaitteet ovat tyypillisesti pienikokoisia laitteita, joissa kennoa valaistetaan lähietäisyydeltä. Aurinkopaneelien testauksessa käytetään tyypillisesti xenon -kaasupurkausvalaisimia, joille tyypillisiä ominaisuuksia ovat korkea säteilyintensiteetti ja useimmissa mittaustarkoituksissa auringonvaloa riittävästi muistuttava spektri. (Oriol). Kasvihuoneissakin käytetyt MH-monimetallilaput ovat yleisiä aurinkopaneelien testausvalaisimia. Myös LED-valaisimia on alettu käyttää aurinkopaneelien laboratorio-testaukseen kasvavissa määrin. Esimerkiksi näitä valaisinteknologioita olisi syytä tutkia valaistuksen parantamiseksi.

Valaisimien nykyiset telineet ovat suurikokoiset, mikä tekee niiden säilyttämisestä ja käyttämisestä hankalaa. Laboratoriossa tilaa on rajallisesti, ja telineet tekevät niiden ympäristössä liikkumisesta hankalaa. Säteilyintensiteetin mittausta kahdella valaisimella ei lähietäisyydellä onnistunut täysin, koska suurten telineiden vuoksi valaisimia ei saatu sijoitettua symmetrisesti mittauspaneeliin nähden.

Paneelien edustalle voisi olla järkevää merkitä lattiaan jonkinlainen koordinaatisto, jotta valaisimien sijoitusta ja etäisyyttä ei tarvitsisi erikseen mitata jokaisessa mittauksessa. Valaisimien ollessa päällä, etäisyyden mittaaminen rullamittalla johti monta kertaa tilanteeseen, jossa mittaaja saattoi katsoa kirkkaaseen valoon. Turvallisuusseikkana valaisimien kirkas valo on syytä ottaa huomioon.

Valaisimien hitaan syttymisen vuoksi niitä ei kannata sammuttaa mittausten välissä. Lämpötilan vaikutusta tutkittaessa valaisimet piti peittää eri toimintapisteiden mittausten välissä, jotta paneelit eivät lämpenisivät. Valaisimien peittämiseen olisi syytä asentaa esimerkiksi jonkinlainen verho erityisesti, jos valaisimien tehoa tullaan kasvattamaan.

5.2 Paneelien kuormittaminen vastuksella ja maksimitehopisteen määrittäminen

Mittauksissa käytettiin vastuslaitteistoja, joilla eri toimintapisteiden määrittäminen edellytti lukuisia kytkentämuutoksia. Mittaukset olisi syytä tehdä yhdellä säätövastuksella, jotta kytkentää ei tarvitsisi muuttaa jatkuvasti. Nykyisellä kokoonpanolla paneelien virta jäi kaikissa mittauksissa alle 0,5 A, joten laboratorion nykyinen säätövastus sopii tarkoitukseen. Näissä mittauksissa 1000 Ω vastuksella pystytään määrittämään virta-jännitekäyrä riittävän tarkasti. Jos valaistusta tullaan muuttamaan ja paneelin virta kasvaa, mittauksiin tarvitaan virrankestoltaan suurempi säätövastus. Lisäksi resistanssin säätöalueen tarve saattaa muuttua oleellisesti paneelien tehon noustessa. Vastuslaitteistoissa havaittiin huomattavia poikkeamia tyyppikilvessä merkittyihin resistanssiarvoihin, mutta itse resistanssin tarkka määrittäminen ei ole oleellista virta-jännite-käyrän määrittämisen kannalta.

Maksimitehopisteen tarkkaan määrittämiseen olisi hyödyksi digitaalinen tai skaalaltaan riittävän pieni tehomittari. Nykyisellä kokoonpanolla analogisen tehomittarin neula ei liiku juuri ollenkaan. Helpoin tapa määrittää maksimitehopiste olisi säätää resistanssia ja tarkkailla tehomittarin lukemaa.

5.3 Virran mittaus lataussäätimen tutkimisessa

Lataussäätimen toimintaa oli vaikea arvioida paneelien alhaisen tehon vuoksi. Ongelma juontaa juurensa jälleen valaisimien säteilyintensiiteettiin. Lataussäädin toimii nimellisen tehoalueensa alapuolella, joten sen käyttäytymistä on vaikea arvioida. Nykyisellä kokoonpanolla paneelien virta ja latausvirta ovat todella pieniä, joten virtapihdeillä mitatut virran arvot ovat siten erittäin epätarkkoja. Yleismittareilla virtojen mittaus voisi olla tarkempaa. Yleismittarien käyttö edellyttäisi lataussäätimen sisään- ja ulostuloihin kytkentämuutosta. molemmat piirit pitäisi katkaista ja kytkeä naparuuveihin, joiden väliin voitaisiin kytkeä virtamittari.

5.4 Akuston lataaminen

Akusto oli purkautunut pitkän käyttökätkon jälkeen, ja sen lataamiseen kului kaksi päivää. Lataussäädin vaatii käynnistykseen akustolta vähintään 8 V jännitteen ja invertteri 19 – 33 V jännitteen. Niihin liittyviä mittauksia ei pystytty suorittamaan ennen akuston latautumista. Akustolle olisi syytä järjestää ylläpitolataus ja tarkistaa sen varaus aina hyvässä ajoin ennen suunniteltua mittausajankohtaa.

5.5 Paneelien lämmitys ja lämpötilan mittaus

Lämpötilan vaikutusta virta-jännite-käyrään arvioitaessa paneeleja lämmitettiin vastuslaitteistojen avulla. Paneelien lämpötilaa tulisi nostaa tarkoituksenmukaisemmalla tavalla, esimerkiksi paneelien taakse asennettavalla lämmityskaapelilla tai tehokkaalla lämpöpuhaltimella. Lämpötilaa olisi syytä nostaa mahdollisimman paljon, koska vaikutus yhtä lämpöastetta kohden on häviävän pieni. Esimerkiksi paneelin lämpötilalla 45 °C mitaustulokset olisivat ilmiön havainnollistamisen kannalta parempia.

Lämpötilaa mitattiin infrapunamittarilla ja paneelin pintaan kiinnitetyllä termoparilla. Termopari osoittautui mittaustavoista luotettavammaksi. Paneelin pinnalla oleva lasi kuitenkin eristää lämpöä jonkin verran, joten lämpötilan mittaus olisi syytä pystyä tekemään itse kennojen pinnalta. Termoparin sijoittamista lasin alle tai paneelin takapuolelle tulisi harkita mittaustuloksien luotettavuuden parantamiseksi.

6 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia Greenlab -mittausympäristön aurinkopaneeli-järjestelmän käyttöä sähkötekniikan opetuksessa. Mittauksista saatiin hyviä tuloksia, joiden pohjalta voitiin suunnitella, millaisia harjoituksia Greenlab –aurinkosähköjärjestelmän avulla voidaan suorittaa. Mittauksissa pystyttiin osoittamaan säteilyintensiteetin ja säteilyn tulokulman vaikutus aurinkopaneelien toimintaan. Paneelien lämpötilaa ei onnistuttu nostamaan paljon, mutta pienelläkin lämpötilaerolla voitiin kuitenkin havaita lievä muutos virta-jännite-käyrässä. Osittaisen varjostuksen vaikutuksia ei ehditty tutkia kovin laajasti, mutta tuloksista havaittiin, että rinnan kytkettynä toisen paneelin varjostuminen ei estä toista toimimasta. Järjestelmän tuottama teho oli valaisimista johtuen yllättävän alhainen. Tämän seurauksena lataussäädin ei toimi optimaalisella tehoalueellaan johtaen sen alentuneeseen hyötysuhteeseen. Invertterin tuottaman vaihtojännitteen käyrämuotoa tarkasteltiin oskilloskoopilla, jolloin nähtiin ulos tulevan muokatun siniaallon porrasmäinen muoto.

Mittauksien aloittaminen viivästyi monien tapahtumien seurauksena, ja lopulta mittaukset jouduttiin suorittamaan erittäin lyhyessä ajassa. Tästä syystä esimerkiksi osavarjostustilanteiden tutkimus jäi suppeaksi, eikä kaikkia suunniteltuja mittauksia ehditty toteuttaa. Tarkoituksena oli tutkia vaikutuksia useissa eri osavarjostustilanteissa, mutta aikataulun puitteissa ehdittiin tutkia vain kahta tilannetta. Lähtökohtaisesti kiireisen aikataulun lisäksi akuston purkautuminen aiheutti merkittävän kahden päivän viivästyksen mittauksiin. Tämän seurauksena invertterin toimintaan ei ehditty perehtyä erilaisissa kuormitustilanteissa.

Lopputuloksena mittausten pohjalta laadittiin luonnos tulevien laboratoriotöiden työohjeesta (Liite 1). Työohjeeseen sisältyvät esitehtävät, mittaukset laboratoriossa ja raportointiin liittyvät tehtävät. Esitehtävissä on aiheeseen liittyviä laskutehtäviä ja niiden esimerkkilaskut. Laboratoriomittausten ohjeet perustuvat tässä työssä tehtyihin mittauksiin ja raportointiin liittyvät tehtävät mittaustulosten analysointiin. Mittaukset veivät paljon aikaa, joten kaikkia mittauksia ei välttämättä voida sisällyttää yhteen laboratoriotyöhön. Toisaalta työssä esitetyillä kehitysehdotuksilla mittausten suorittamisesta voitaisiin tehdä sujuvampaa ja nopeampaa.

Mittausympäristönä Greenlab-aurinkopaneelijärjestelmä on jo nykyisessä muodossaan varsin toimiva kokonaisuus ja pienillä muutoksilla siitä voidaan tehdä parempi. Suurin osa mittauksista onnistui suunnitellulla tavalla ja mittausmenetelmät osoittautuivat toimiviksi. Kehitettävää havaittiin valaisimissa, mittauksissa käytetyssä säätövastuksessa, virran mittaustavassa lataussäädintä tutkiessa, akuston ylläpidossa, aurinkopaneelien lämmittämisessä ja niiden lämpötilan mittauksessa. Mittaustulosten luotettavuus ja tarkkuus voidaan kyseenalaistaa, kun eri olosuhteissa tapahtuvia muutoksia tarkastellaan milliampeerien mittakaavassa. Siksi tärkein kehityskohde järjestelmässä on valaistus, jolla ei saatu aurinkopaneeleita tuottamaan toivotun suuruista sähkötehoa. Säteilyintensiteetin kasvattaminen esimerkiksi viisinkertaiseksi johtaisi noin viisinkertaiseen virran ja tehon tuottoon paneeleilta. Tällöin mittaustuloksia voitaisiin pitää luotettavampina ja erityisesti maksimitehon tarkastelu olisi tarkempaa. Selvitettäväksi jää, miten valaistusta voitaisiin parantaa tarkoitukseen sopivammaksi kustannusten nousematta liian suuriksi.

Vastoinkäymisistä ja kiireestä huolimatta tavoitteet lopulta saavutettiin. Alkuperäinen tarkoitus oli astua valmiiseen mittausympäristöön, jossa suoritettaisiin erilaisia mittauksia referenssiksi tuleville mittauksille. Osassa mittauksista kuitenkin tarvittiin luovia ideoita, kun tarkoituksenmukaisia välineitä ei ollut tarjolla. Mittausmenetelmät todettiin toimiviksi ja laitteistossa havaituille puutteille esitettiin kehitysehdotukset, joten kokonaisuutena opinnäytetyötä voidaan pitää onnistuneena.

LÄHTEET

CentroSolar AG. S-Class Professional. [PDF]. Viitattu 1.5.2015

The Engineering Projects. Modified Sine Wave Design with Code. [www-sivu]. Viitattu 15.5.2015

<http://www.theengineeringprojects.com/2012/11/modified-sine-wave-design-with-code.html>

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. AMK-Kustannus Oy Tammer-tekniikka

Korpela, A. 2014. Aurinkosähkön perusteet. [PDF]. Viitattu 10.3.2015.

Kämäräinen, T. 2014. Greenlab, Aurinkosähköjärjestelmä. Sähkötekniikan koulutusohjela. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

LG. 2010. PLS (Plasma Lighting System) Service manual. [PDF]. Viitattu 10.5.2015

Morningstar Corporation. 2009. Tristar MPPT Installation and Operation Manual.

Mäki, A. 2011. Aurinkopaneelin maksimitehopisteen seuranta. [PDF]. Viitattu 10.5.2015

Mäki, A. 2013. Effects of Partial Shading Conditions on Maximum Power Points and Mismatch Losses in Silicon-Based Photovoltaic Power Generators. [PDF]. Väitöskirja. Viitattu 10.5.2015

Nikkilä, J., Paavola, J., Pöyhönen, J. Aurinkokennotyyppien ja aurinkokeräinten vertailu. [PDF]. Viitattu 15.4.2015

Oulun ammattikorkeakoulu. 2014. Pienten tuuli- ja aurinkosähköjärjestelmien asentaminen. [PDF]. Viitattu 10.5.2015

ORIEL. Oriel Product Training. [PDF]. Viitattu 15.5.2015

The Physics Classroom. 2012. Light intensity [PDF]. Viitattu 15.5.2015

SESKO ry. SFS 5264. Viitattu 10.3.2015

Vatajankosken sähkö. Aurinkosähköjärjestelmät. [PDF]. Viitattu 10.5.2015

Victron Energy B.V. 2008. Victron energy MultiPlus Compact manual.

World Meteorological Organization. Weather & Climate Extremes Archive. [www-sivu]. Viitattu 15.4.2015

<http://wmo.asu.edu/#global>

LIITTEET

Liite 1. Työohje

1 ESITEHTÄVÄT

1(5)

Taulukossa 1 on esitetty aurinkopaneelin tekniset tiedot. Paneeleita on kytketty kaksi kappaletta rinnakkain.

TAULUKKO 1. Aurinkopaneelien tekniset tiedot

P_{\max} / W	240
P_{\min} / W	232,8
U_{mp} / V	28,75
U_{oc} / V	36,53
I_{mp} / A	8,35
I_{sc} / A	8,7
$f_p / \%$	75,52
U_{\max} / V	1000
$TC_{P_{mp}}(STC) / \%$	± 3
$TC_{P_{mp}} / \%/K$	-0,44
$TC_{U_{oc}} / \%/K$	-0,35
$TC_{I_{sc}} / \%/K$	0,03
T_{amb}	- 40 ... + 85

1.1 Laske aurinkopaneelien oikosulkuvirta, kun niihin kohdistuu kohtisuoraan säteilyintensiteetti G , suuruudeltaan 200 W/m^2 . Paneelien lämpötila on $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot n \cdot I_{sc(STC)} = \frac{200 \frac{W}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} \cdot 2 \cdot 8,7 \text{ A} = 3,48 \text{ A}$$

, jossa G on paneeliin kohdistuva säteilyintensiteetti, G_{STC} on standardimittausolosuhteiden säteilyintensiteetti ($G = 1000 \text{ W/m}^2$), I_{sc} on paneelin oikosulkuvirta, n on rinnan kytkettyjen aurinkopaneelien lukumäärä ja $I_{sc(STC)}$ on standardimittausolosuhteissa mitattu paneelin oikosulkuvirta.

1.2 Laske aurinkopaneelien oikosulkuvirta, kun vastaava 200 W/m^2 säteilyintensiteetti kohdistuu paneeleihin 45° kulmassa paneelien normaaliin nähden. Paneelien lämpötila on $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

2(5)

$$I_{sc} = \frac{G \cdot \cos(\alpha)}{G_{STC}} \cdot I_{sc(STC)} = \frac{200 \frac{W}{m^2} \cdot \cos(45)}{1000 \frac{W}{m^2}} \cdot 2 \cdot 8,7 A \approx 2,46 A$$

1.3 Laske yhden aurinkopaneelien tyhjäkäyntijännite, kun paneeleihin kohdistuva kohtisuora säteilyintensiteetti on 1000 W/m^2 ja paneelin lämpötila on $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

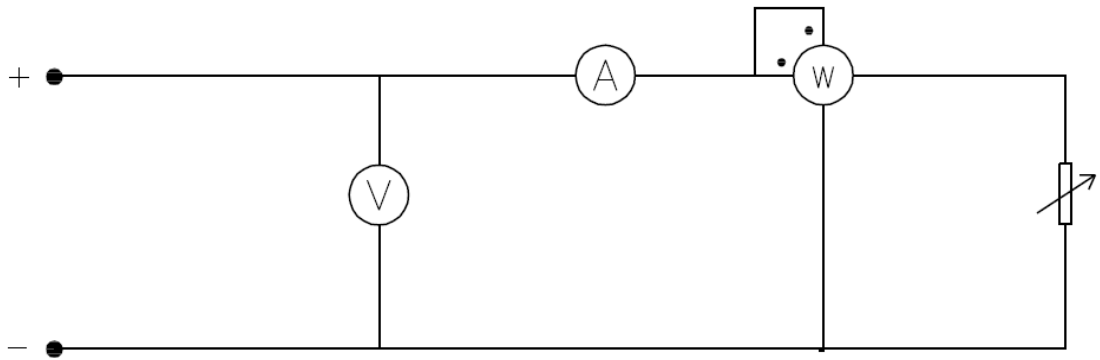
$$\begin{aligned} U_{oc(45^\circ\text{C})} &= U_{oc(STC)} + U_{oc(STC)} \cdot TC_{U_{oc}} \cdot (\Delta T) \\ &= 36,53 V + 36,53 V \cdot (-0,0035) \cdot (45 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &\approx 33,97 V \end{aligned}$$

, jossa $U_{oc(45^\circ\text{C})}$ on paneelien oikosulkujännite lämpötilassa $45 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_{oc(STC)}$ on paneelien oikosulkujännite standardimittausolosuhteissa, $TC_{U_{oc}}$ on tyhjäkäyntijännitteen lämpötilakerroin ja ΔT on lämpötilan muutos standardimittausolosuhteisiin nähden.

2 MITTAUKSET LABORATORIOSSA

Tutki valaisimien tuottamaa säteilyintensiteettiä eri etäisyyksillä. Kohdista valaisin mahdollisimman tarkasti kohtisuoraan mittauspaneeliin. Mittaa paneelin oikosulkuvirta eri etäisyyksillä. Toista mittaukset kahdella valaisimella. Laske mitattujen oikosulkuvirtojen perusteella valaisimien säteilyintensiteetit eri etäisyyksillä.

Tutki virta-jännite-käyrän muodostumista eri olosuhteissa. Paneelin napoihin kytketään säätövastus, jolla muutetaan aurinkopaneelien kuormitusta. Mittaa paneelien napojen välinen jännite ja kuormituksen virta eri resistanssin arvoilla. Mittaa myös oikosulkuvirta ja tyhjäkäyntijännite. Laske (*tai mittaa) aurinkopaneelien teho eri toimintapisteissä. (*Säädä säätövastuksella hitaasti paneelien kuormitusta ja tarkkaile tehomittarin lukemaa maksimitehopisteen löytämiseksi.) Mittaa maksimitehopisteessä säätövastuksen resistanssi. Mittaa myös paneelien lämpötila. Mittauskytkentä on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Mittauskytkentä

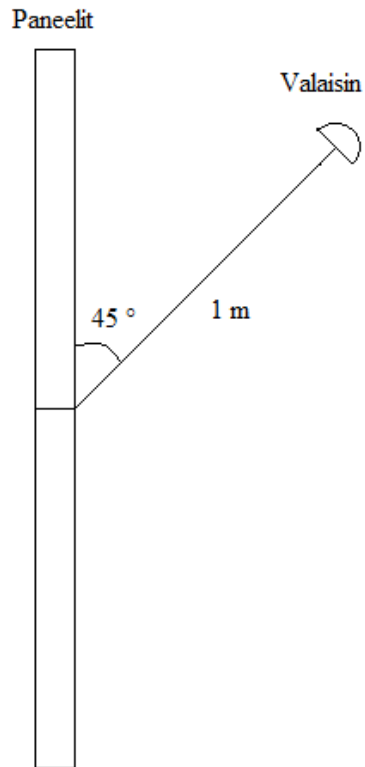
(*Mikäli tehoa pystytään mittaamaan riittävällä tarkkuudella)

2.1 Säteilyintensiteetin vaikutus virta-jännite-käyrään

Suorita edellä mainitut mittaukset 1 m etäisyydellä ja kahdella - kolmella eri valaisimien etäisyydellä (esim. 0,6 m, 1,2 m, 1,8 m). Valaisimet sijoitetaan kohtisuoraan mahdollisimman keskelle paneeleihin nähden. Suorita lisäksi mittaus yhdellä valaisimella, joka asetetaan kohtisuoraan 1 m etäisyydelle paneelien keskelle.

2.2 Säteilyn tulokulman vaikutus

Suorita mittaukset sijoittamalla yksi valaisin 45° kulmaan paneeleihin nähden 1 m etäisyydelle paneelien keskilinjasta kuvan 2 mukaisesti. Vertaa tuloksia edellisessä mittauksessa yhdellä kohtisuoraan asetellulla valaisimella mitattuihin tuloksiin.



Kuva 2. Valaisimen sijoittelu

2.3 Lämpötilan vaikutus

Suorita mittaukset kahdessa eri lämpötilassa. Suorita mittaukset ensin huoneenlämpötilassa. Seuraavaksi paneelien lämpötilaa nostetaan (esim. lämpöpuhaltimella). Toista mittaukset lämpötilan noustua riittävästi. Valaisimet sijoitetaan kohtisuoraan 1 m etäisyydelle mahdollisimman keskelle paneeleihin nähden.

2.4 Osittaisen varjostuksen vaikutus

Varjosta yhtä aurinkopaneelia rullaverholla lisäten varjostusta kennorivi kerrallaan ja toista mittaukset jokaisessa osavarjostustilanteessa. Seuraavaksi varjosta molempia paneelija samanaikaisesti kennorivi kerrallaan ja toista mittaukset. Valaisimet sijoitetaan kohtisuoraan 1 m etäisyydelle mahdollisimman keskelle paneeleihin nähden.

2.5 Lataussäätimen teho ja hyötysuhde

Kytke paneelit laitteistokärryyn järjestelmän käyttöohjetta noudattaen. Mittaa paneelien ja lataussäätimen ulostulon jännite yleismittareilla laitteistokärryn naparuuveilta ”Paneelijännite DC” ja ”Akun jännite”. Mittaa paneelien ja lataussäätimen ulostulon virta oskilloskooppiin kytketyillä virtapihdeillä. Laske paneelien ja lataussäätimen ulostulon tehot ja niiden perusteella lataussäätimen hyötysuhde. Valaisimet sijoitetaan kohtisuoraan 1 m etäisyydelle mahdollisimman keskelle paneeleihin nähden. Varjosta paneeleita rullaverhoilla edellisen mittauksen mukaisesti ja vertaa paneelin tehoa edellisen mittauksen tuloksiin.

2.6 Invertterin vaihtojännitteen aaltomuoto

Valaisimet sijoitetaan kohtisuoraan 1 m etäisyydelle mahdollisimman keskelle paneeleihin nähden. Kytke oskilloskooppi laitteistokärryn naparuuveihin ”230V AC” ja tarkastele invertterin tuottaman vaihtojännitteen aaltomuotoa. Tallenna kuvakaappaukset havainnoista.

3 TYÖSELOSTUS JA SIIHEN LIITTYVÄT TEHTÄVÄT

Piirrä mittaustuloksien perusteella käyrät virrasta jännitteen funktiona ja tehosta jännitteen funktiona ja vertaa tuloksia ensimmäisessä mittauksessa 1 m etäisyydellä mitattuihin tuloksiin.

Tarkastele osavarjostustilanteiden virta- ja tehokäyriä. Havaitaanko käyrissä useita paikallisia maksimitehopisteitä?

Vertaa lataussäätimen tutkimuksessa mitattuja paneelien jännitteitä, virtoja ja tehoja säätövastuksella mitattuihin arvoihin. Onnistuiko lataussäädin tavoittamaan paneelien maksimitehopisteen. Jos useita paikallisia maksimitehopisteitä havaittiin edellisessä mittauksessa, löysikö säädin globaalimaksimitehopisteen?