

Tommi Kääriäinen

# Automaattinen hyötysuhdemittausjärjestelmä aurinkosähkövaihtosuuntaajille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

15.3.2013

## **Alkulause**

Esitän kiitokseni kaikille, jotka olivat mukana tämän työn edistymisessä. Erityisesti haluan kiittää ins. Anssi Leinosta, ins. Dung Leta ja muita testaaajia, joiden panos työhön liittyneissä laboratoriotesteissä oli välttämätön. Kiitän myös työn ohjaajia dipl.ins. Kimmo Heinosta ja dipl.ins. Janne Mäntykoskea. Erityiskiitos kuuluu Antti Kulhbergille arvokkaasta neuvosta.

Helsingissä 15.3.2013

Tommi Kääriäinen

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tommi Kääriäinen Automaattinen hyötysuhdemittausjärjestelmä aurinkosähkö- vaihtosuuntaajille 40 sivua + liite 15.3.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikka
Ohjaajat	suunnittelupäällikkö Kimmo Heinonen lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tässä insinöörityössä selvitettiin kokeellisesti, miten toteuttaa automatisoitu hyötysuhteenmittausjärjestelmä aurinkosähkövaihtosuuntaajien testaukseen. Hyötysuhteiden sekä staattisten ja dynaamisten MPPT-hyötysuhteiden määritykset standardien IEC 61683 ja EN 50530 mukaisesti oli havaittu työn tilanneessa yrityksessä työläiksi, ja automatisoinnilla haluttiin tehostaa laitteiden testausta. Opiskelijaryhmä oli aiemmin työskennellyt järjestelmän toteuttamiseksi, mutta työtä ei ollut saatettu loppuun johtuen ongelmista valitun DC-lähteen tuottaman sähkön laadun suhteen.</p> <p>Mittausjärjestelmän laitteiston pääosina toimivat aurinkopaneelistosimulaattorina toimimaan kykenevä DC-lähde ja tarkkuustehoanalyysointilaite. Järjestelmään kuuluva tietokoneohjelmisto toteutettiin NI LabVIEW'illa. Ohjelmisto luo mittausasetukset ja aurinkopaneelistosimulaation ominaiskäyrät, ohjaa laitteita, lukee ja tallentaa mittausdatan analyysointilaiteelta ja käsittelee tulokset. Tehoanalyysointilaiteen ohjaus, mittausdatan luku sekä osa käyttöliittymästä perustuivat opiskelijaryhmän työhön. DC-lähde, jonka ajurin toteutus oli suurin yksittäinen tehtävä työssä, oli eri valmistajan laite kuin aiemmassa työssä käytetty laite.</p> <p>Ajanpuutteen vuoksi järjestelmään ei ehditty toteuttaa dynaamisten MPPT-hyötysuhteen mittausta eikä automaattista tehonsäätöä hyötysuhdemittauksiin. Järjestelmän testausta ei ehditty suorittaa loppuun asti. Voitiin kuitenkin todeta, että järjestelmällä on mahdollista suorittaa mittauksia ja laskea tuloksia, mutta DC-lähdettä ohjaava osa ohjelmasta todettiin epävakaa aiheuttaen ohjelmiston osittaisia tai täydellisiä kaatumisia mittauksen aikana.</p> <p>Järjestelmää on mahdollista kehittää parantamalla luotettavuutta, toteuttamalla dynaamisten MPPT-hyötysuhteen mittaus sekä automaattinen ominaiskäyrien ja tehon säätö. Tärkein suunta jatkokehityksessä on luotettavuuden parantaminen.</p>	
Avainsanat	testausautomaatio, aurinkosähkövaihtosuuntaaja, LabVIEW, hyötysuhde, MPPT, aurinkoenergia

Author Title	Tommi Kääriäinen Automatic Efficiency Measurement System for Solar Inverters
Number of Pages Date	40 pages + appendix 15 March 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructors	Kimmo Heinonen, Verification Manager Janne Mäntykoski, Senior Lecturer
<p>This thesis describes an automatic efficiency measurement system for solar inverters. The motivation for automating efficiency measurement is improving productivity in testing solar inverters. Efficiency measurements and static or dynamic MPPT efficiency measurements according to standards IEC 61683 and EN 50530 were considered laborious and time consuming by the testing department of the company for which this work was carried out. A team of students had earlier worked on implementing the system; however problems with the quality of output power of the DC source used by them precluded them from finishing their work.</p> <p>The system consists of a programmable DC source serving as a photovoltaic simulator, a power analyzer and a computer running the software developed using NI LabVIEW. The DC source used is a different model from another manufacturer. The software creates characteristic curves for photovoltaic simulation and the setup data for the measurements, controls the hardware during the measurement, reads and logs the measurement data and calculates the results. The power analyzer driver and parts of the user interface are based on the work of the student team. A major part of the work was implementing a driver for the new DC source.</p> <p>Due to time constraints it was not possible to implement full support for dynamic MPPT measurement or automated power control for measurements according to IEC 61683. Also due to the same constraints, testing of the system was insufficient. However, it was found that it is possible to carry out measurements and calculate results with the system. The driver for the DC source has instability issues, which have been found to result in the control program fully or partly crashing.</p> <p>For further development of the system, the main priority is improved reliability. Most important features to be added would be automatic power control and adjustment of characteristic curves. Furthermore, support for dynamic MPPT efficiency measurement would be useful.</p>	
Keywords	automated testing, solar power, solar inverter, MPPT, efficiency, LabVIEW

# Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sähköisten suureiden mittaaminen</b>	<b>1</b>
2.1	Virran, jännitteen ja tehon mittaus	1
2.2	Mittaustarkkuudesta yleisesti	2
<b>3</b>	<b>Aurinkosähkövoimala</b>	<b>2</b>
3.1	Aurinkokennot, -paneelit ja -paneelistot	2
3.1.1	Aurinkosähkövoimalan ja aurinkokennon rakenne	2
3.1.2	Aurinkokennon sijaiskytkentä	3
3.2	Aurinkosähkövaihtosuuntaaja	6
3.2.1	Aurinkosähkövaihtosuuntaajan toimintaperiaate	6
3.2.2	Aurinkosähkövaihtosuuntaajan häviöt	7
<b>4</b>	<b>Aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen mittaus</b>	<b>7</b>
4.1	Aurinkosähkövaihtosuuntaajien suorituskyvyn mittaus ja standardit	7
4.2	Hyötysuhdemittaus standardin IEC 61683 mukaan	8
4.2.1	Aurinkosähkövaihtosuuntaajan hyötysuhteen määritelmä	8
4.2.2	Mittausolosuhteet ja mitattavat suureet hyötysuhteen mittauksessa	9
4.3	MPPT-hyötysuhdemittaus standardin EN 50530 mukaisesti	9
4.3.1	MPPT-hyötysuhteet ja mitattavat suureet	9
4.3.2	Aurinkopaneelistomallit MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä	12
4.3.3	Mittausolosuhteet staattisen MPPT-hyötysuhteen mittauksessa	15
4.3.4	Mittausolosuhteet dynaamisen MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä	15
4.4	Ohjelmoitavat DC-lähteet ja aurinkopaneelistosimulaatio	16

<b>5</b>	<b>Automatisoitu mittausjärjestelmä</b>	<b>17</b>
5.1	Kehitetyn mittausjärjestelmän synty ja yleispiirteet	17
5.1.1	Mittausjärjestelmän pääosat	17
5.1.2	Mittausjärjestelmän synty	17
5.1.3	Mittausjärjestelmän käyttö standardien mukaisissa mittauksissa	18
5.2	Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmisto	18
5.2.1	Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston rakenne	18
5.2.2	Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston kehitystyö	20
5.2.3	Mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelma	20
5.2.4	Mittauksen ohjausohjelmisto	23
5.2.5	Tulosten laskentaohjelma	26
5.3	Mittausjärjestelmässä käytettävä DC-lähde	28
5.4	Mittausjärjestelmässä käytettävä tehoanalysaattori	28
5.5	Mittaaminen automatisoidulla mittausjärjestelmällä	29
5.6	Mittausjärjestelmässä käytettävä mittauskytkentä	29
<b>6</b>	<b>Automatisoidun mittausjärjestelmän testaus</b>	<b>30</b>
6.1	Testauksessa käytetyt mittauskytkennät	30
6.2	Automatisoidun mittausjärjestelmän testauksen tulokset	31
6.2.1	Mittausjärjestelmän alustavat toimintakokeilut	31
6.2.2	Ominaiskäyrien toimintaan saattamiseen johtavat testit	33
6.2.3	Mittausjärjestelmän lopputestaus	34
<b>7</b>	<b>Automatisoidun mittausjärjestelmän kehitystyön tulosten arviointi</b>	<b>36</b>
7.1	Mittausjärjestelmän laitteiston toiminta ja valmistajan tuki	36
7.2	Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston toiminta	36
7.2.1	DC-lähdeajurin luotettavuusongelmat	36
7.2.2	Ohjelmiston muun osan toiminta	37
7.3	Hyötysuhdemittausjärjestelmän kehitystyön tavoitteiden toteutuminen	38
7.4	Automatisoidun hyötysuhdemittausjärjestelmän jatkokehitys	38
<b>8</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>39</b>

Liitteet

**Liite 1. Säteilivoimakkuudet ja ajoitukset dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mitauksessa**

## Lyhenteet

AC	<i>Alternating Current.</i> Vaihtovirta.
c-Si	<i>Crystal Silicon.</i> Kiteinen pii. Aurinkokennoteknologia, jossa aurinkokenno koostuu paksusta kerroksesta kiteistä piitä.
CSV	<i>Comma Separated Values.</i> Tekstiedostomuoto, jossa taulukkolaskimen solujen arvot on erotettu tietyillä erottimilla.
DC	<i>Direct Current.</i> Tasavirta.
DUT	<i>Device Under Test.</i> Testattava laite.
EN	<i>Europäische Norm.</i> Eurooppalaisen standardointijärjestö CEN:n standardien tunnuskirjaimet.
FFT	Fast Fourier Transform. Nopea Fourier'n muunnos. Numeerinen Fourier'n muunnoksen laskenta-algoritmi aikatasosta taajuustasoon.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i> Kansainvälinen sähköalan standardointijärjestö.
MPP	<i>Maximum Power Point.</i> Maksimitehopiste. Se virran ja jännitteen arvo, jolla systeemi saavuttaa suurimman tehonsa.
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking.</i> Maksimitehopisteen seuraaminen. MPPT:tä toteuttava laite pyrkii asettamaan syöttövirtansa ja -jännitteensä siten että syöttöteho maksimoituu.
TF	<i>Thin Film.</i> Ohutkalvo. Aurinkokennoteknologia, jossa aurinkokenno on puolijohdemateriaalista lasilevyjen väliin tehty ohutkalvorakenne.
VI	<i>Virtual Instrument.</i> Virtuaali-instrumentti. LabVIEW-ohjelman pienin itsenäinen yksikkö



## 1 Johdanto

Insinööriyössä tutkitaan, miten voidaan rakentaa sellainen automatisoitu mittausjärjestelmä, joka kykenee mittaamaan sähköverkkoon kytkettäväksi tarkoitettun aurinkosähkövaihtosuuntaajan hyötysuhteen sekä MPPT-hyötysuhteet standardien IEC 61683 ja EN 50530 mukaisesti.

Kasvaneen tietoisuuden ilmastonmuutoksesta, öljyn kallistumisen, energiakulutuksen siirtymisen matalammille leveysasteille ja aurinkopaneelien hinta-tehosuhteen laskun myötä aurinkoenergian käyttö on lisääntynyt maailmassa voimakkaasti. Aurinkosähköjärjestelmissä hyötysuhde on tärkeä ominaisuus sekä ympäristösyistä että taloudellisista syistä. Hyvä mittaustarkkuus antaa mahdollisuuden taata asiakkaalle korkea hyötysuhde.

Sähkön tuottaminen auringon säteilystä voi tapahtua valosähköistä ilmiötä hyödyntämällä tai käyttämällä auringon säteilyä generaattoria pyörittävän lämpövoimakoneen (esimerkiksi höyryturbiini tai Stirling-moottori) lämmönlähteenä. Aurinkosähkövaihtosuuntaajia käytetään tuottaessa sähköä valosähköisellä ilmiöllä aurinkokennojen avulla.

Työn tilanneessa yrityksessä on havaittu, että hyötysuhdemittaukset ovat työläitä. Testauksen tehostamiseksi halutaan automatisoinnilla helpottaa näiden mittausten suorittamista. Lisäksi automaattinen tulosten tallennus ja laskenta vähentää mahdollisuutta inhimillisiin virheisiin. Työn pohjana on keväällä 2012 Metropolia Ammattikorkeakoulun opiskelijoiden tekemä innovaatioprojekti samasta aiheesta.

## 2 Sähköisten suureiden mittaaminen

### 2.1 Virran, jännitteen ja tehon mittaus

Digitaalisella mittalaitteella virran, jännitteen ja tehon mittaus voidaan toteuttaa jännitteen hetkellisarvon mittauksena. Virran hetkellisarvo voidaan mitata jännitteenä tunnetun resistanssin yli ja virran ja jännitteen hetkellisarvojen tulona saadaan tehon hetkellisarvo. Kun näytteistystaajuus on moninkertainen verrattuna mitattavan AC-suureen

korkeimpaan mitattavaan taajuuskomponenttiin, voidaan saatujen hetkellisarvojen perusteella, kun hyödynnetään digitaalista signaalinkäsittelyä, mitata myös, muiden muassa

- virran ja jännitteen tehollisarvoja
- pätötehoa
- loistehoa
- näennäistehoa
- tehokerrointa
- huippukerrointa ja
- mitattavan suureen taajuuskomponentteja.

Matalataajuisien (etenkin sähköverkosta aiheutuvien 50 Hz:n tai 60 Hz:n taajuisien) häiriöiden minimoimiseksi DC-suureiden mittauksessa keskiarvoistetaan hetkellisarvoja vähintään matalataajuisimman oletetun häiriön jaksonajan verran. [1.]

## 2.2 Mittaustarkkuudesta yleisesti

Kaikissa mittauksissa esiintyy mittausepävarmuutta. Tämä virhe voidaan jakaa systemaattiseen virheeseen ja satunnaisvirheeseen. Systemaattinen virhe on mahdollista ottaa huomioon mittaustulosten käsittelyssä, kun taas satunnaisvirhettä voidaan hallita lisäämällä toistoja mittauksessa ja keskiarvoistamalla tuloksia. [1.]

## 3 Aurinkosähkövoimala

### 3.1 Aurinkokennot, -paneelit ja -paneelistot

#### 3.1.1 Aurinkosähkövoimalan ja aurinkokennon rakenne

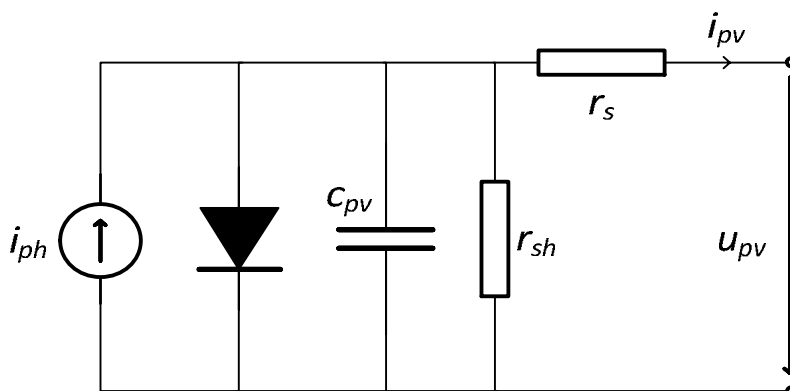
Valosähköistä ilmiötä (*photovoltaic effect*) hyödyntävä aurinkosähkövoimala (*solar generator*) koostuu aurinkokennoista (*solar cell*), vaihtosuuntaajasta (*inverter*) sekä muista osista kuten kaapeloinnista, sulakkeista ja katkaisimista. Aurinkokennot tuottavat

valosähköisellä ilmiöllä sähköä auringon säteilystä. Vaihtosuuntaaja muuntaa aurinkokennojen tuottaman tasajännitteen (DC) vaihtojännitteeksi (AC) ja säätää aurinkokennojen toimintapisteen optimaaliseksi.

Aurinkokennot ovat erikoisrakenteisia valoherkkiä puolijohdediodeja (valodiodeja). Käytettävä puolijohdemateriaali voi olla pii tai yhdistepuolijohde. Yhden aurinkokennon tuottama jännite jää maksimissaan tyypillisillä kiteisestä piistä koostuvilla komponenteilla noin 0,6 V:n. Näin ollen aurinkokennoja kootaan suuremmiksi sarjaan- ja rinnankytketyiksi yksiköiksi eli paneeleiksi (*module*) ja paneelistoiksi (*string, array*), jotta saataisiin käyttökelpoisia jännitteitä (yleiseen sähköverkkoon kytkettävissä järjestelmissä tyypillisesti vähintään noin 350 V). [2 s. 4–13.]

### 3.1.2 Aurinkokennon sijaiskytkentä

Diodina aurinkokennoja voidaan puolijohdemateriaalista riippumatta kuvata samantyyppisellä sijaiskytkennällä, joka koostuu virtalähteestä ( $i_{ph}$ ), jonka kanssa rinnan on diodi, kondensaattori ja vastus ( $r_{sh}$ ) sekä näiden kanssa sarjassa vastus ulostulossa ( $r_s$ ). Kyseessä on niin sanottu yksidiodimalli. Diodin vaikutuksesta kytkennän jännitevirta- eli  $I(U)$ -ominaiskäyrä on eksponentiaalinen. Kuvassa 1 esitetään tämä sijaiskytkentä. [2, s. 7.]



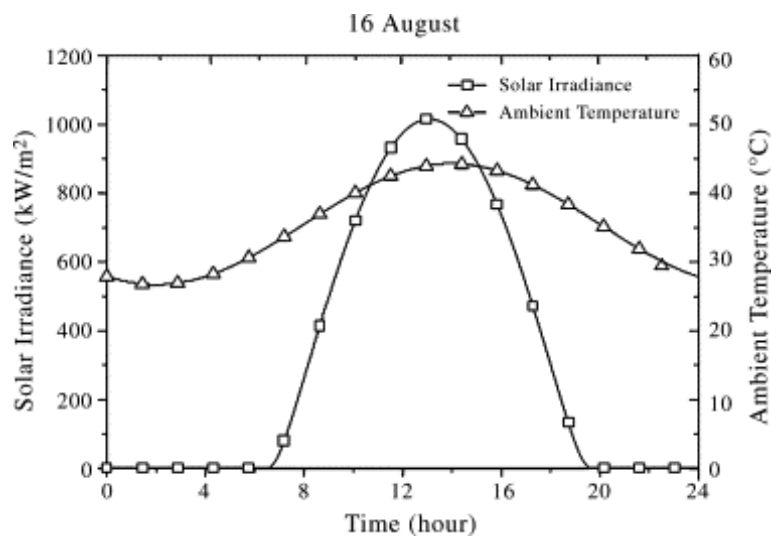
Kuva 1. Aurinkokennon yksinkertainen sijaiskytkentä

Tällaisella kytkennällä on globaali maksimi ulostulosta saatavassa tehossa virralla  $i_{pv}$ , joka on pienempi kuin oikosulkuvirta  $i_{sc}$  ja suurempi kuin nolla. Kun kyseinen piiri on avoin, jännite  $u_{pv}$  on maksimissaan, ja oikosulkuvirralla jännite  $u_{pv}$  on nollassa. Jännitteillä, jotka ovat pienempiä kuin maksimitehon (*MPP, Maximum Power Point*) jännite eli

MPP-jännite (*MPP voltage*) piiri toimii kuin epäideaalinen virtalähde ja jännitteillä, jotka ovat suurempia kuin maksimitehon jännite piiri toimii kuin epäideaalinen jännitelähde. [2, s. 7–8.]

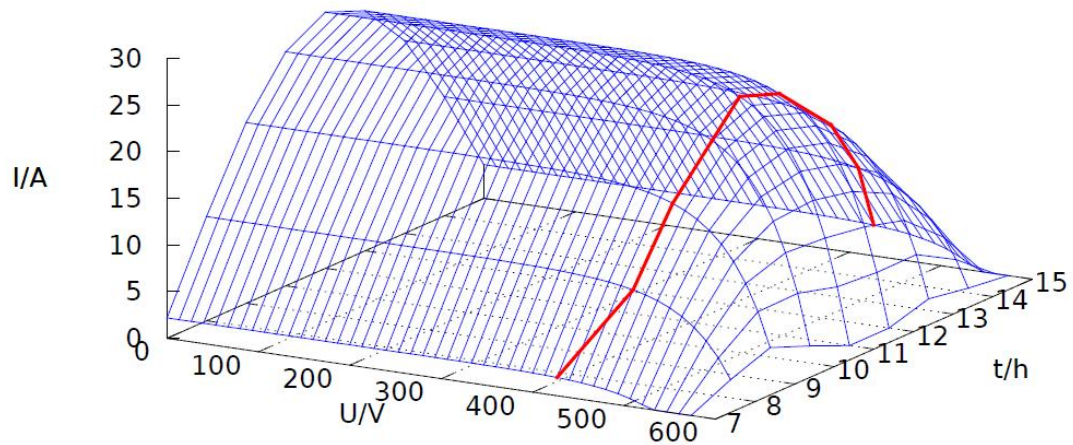
Lämpötila ja auringon säteilyvoimakkuus vaikuttavat aurinkokennon toimintaan. Mitä suurempi säteilyvoimakkuus, sitä suurempi on sijaiskytkennän virtalähteen tuottama virta. Lämpötila vaikuttaa aurinkokennon jännitteeseen negatiivisesti, mitä korkeampi lämpötila, sitä matalampi jännite. Koska maksimitehopiste muuttuu merkittävästi, kun säteilyvoimakkuus, lämpötila tai molemmat muuttuvat, vaihtosuuntaajan on kyettävä löytämään maksimitehopiste automaattisesti ja pysymään lähellä sitä. Toimintoa kutsutaan nimellä MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). [2, s. 8.]

Aurinkopaneeliston käyrien ja maksimitehopisteen muuttumista päivän aikana havainnollistaa seuraava esimerkki, jossa käytetään Larbin, Bouhdjarin ja Cherguin [3] lämpötila- ja säteilyvoimakkuusmittaustuloksia. Lämpötila ja säteilyvoimakkuus olivat Algerian aavikolla yhden päivän aikana elokuussa 2004 kuvassa 2 esitettävien mukaiset:



Kuva 2. Lämpötila (kolmiot) ja säteilyvoimakkuus (neliöt) vuorokauden aikana [3]

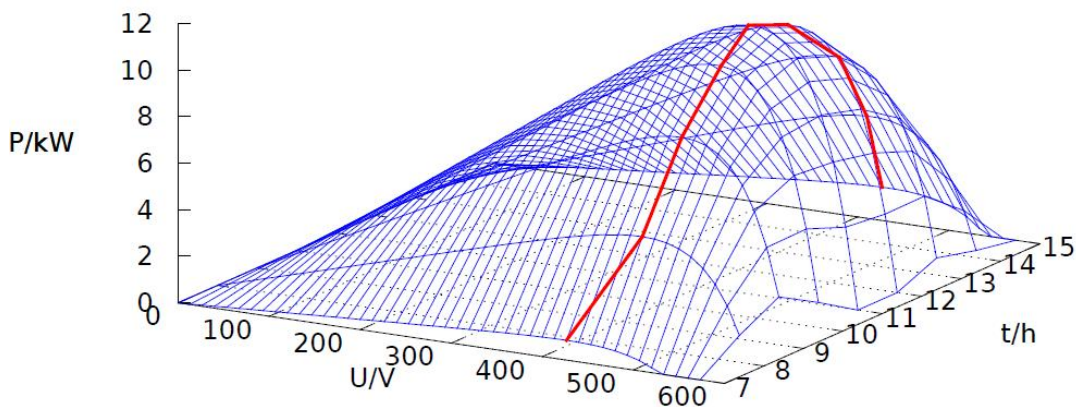
Oletetaan, että kuvan 2 mukaisissa lämpötila- ja valaistusoloissa on aurinkopaneelisto, jonka maksimitehopisteen jännite säteilyvoimakkuudella  $1\,000\text{ W/m}^2$  on  $500\text{ V}$  ja teho  $12\text{ kW}$ , kun käytetään luvussa 4.3.2 esitettävää aurinkopaneelistomallia. Tällaisen paneeliston tuottama virta jännitteen ja kellonajan funktiona mallin mukaan päivän valoisana aikana esitetään kuvassa 3 (ks. seur. s.).



Kuva 3. 12 kW aurinkopaneeliston tuottama virta lähteessä [3] esitetyissä olosuhteissa

Sininen verkkograafi kuvaa virtaa ja punainen käyrä kuvaa maksimitehopisteen virtaa. On huomattava, että kuvan 3 graafi pätee vain sellaisilla jännitteillä, joilla virta on suurempi kuin 0 A. Kuvasta voidaan havaita saatavissa olevan virran voimakas riippuvuus säteilyvoimakkuudesta. Samoin voidaan havaita maksimitehopisteen siirtyminen matalammalle jännitteelle ja korkeammalle virralle mentäessä aamupäivästä keski- ja ilta-päivään.

Kuva 4 esittää vastaavaa tehoa. Teho esitetään sinisellä verkkograafilla ja maksimiteho punaisella käyrällä.



Kuva 4. 12 kW aurinkopaneeliston tuottama teho lähteessä [3] esitetyissä olosuhteissa

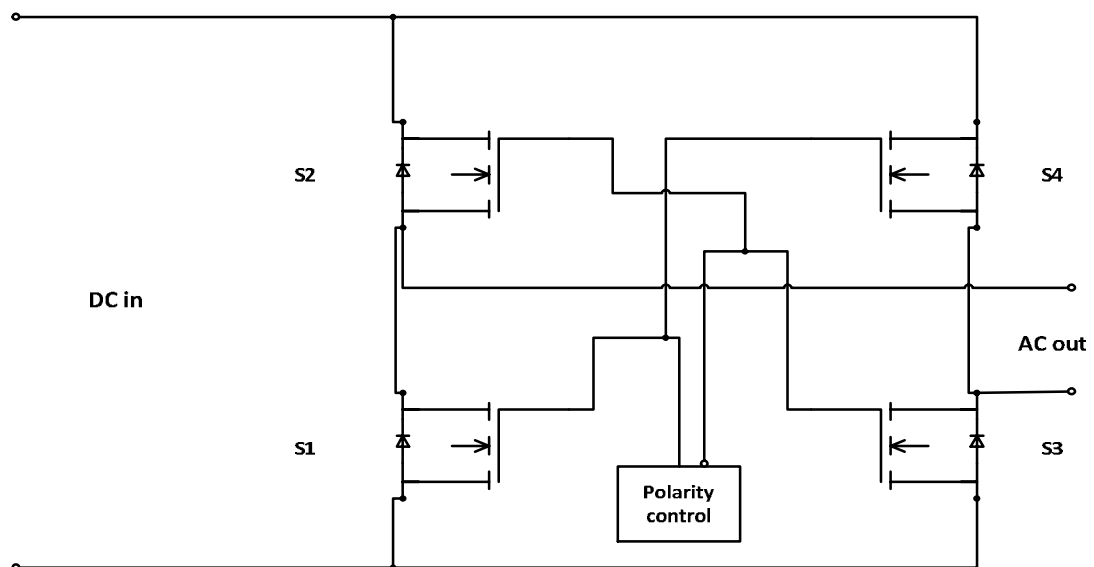
Kuvasta 4 voitiin havaita, että aurinkopaneelistosta saatava teho laskee jyrkästi, kun jännite ylittää maksimitehon jännitteen.

## 3.2 Aurinkosähkövaihtosuuntaaja

### 3.2.1 Aurinkosähkövaihtosuuntaajan toimintaperiaate

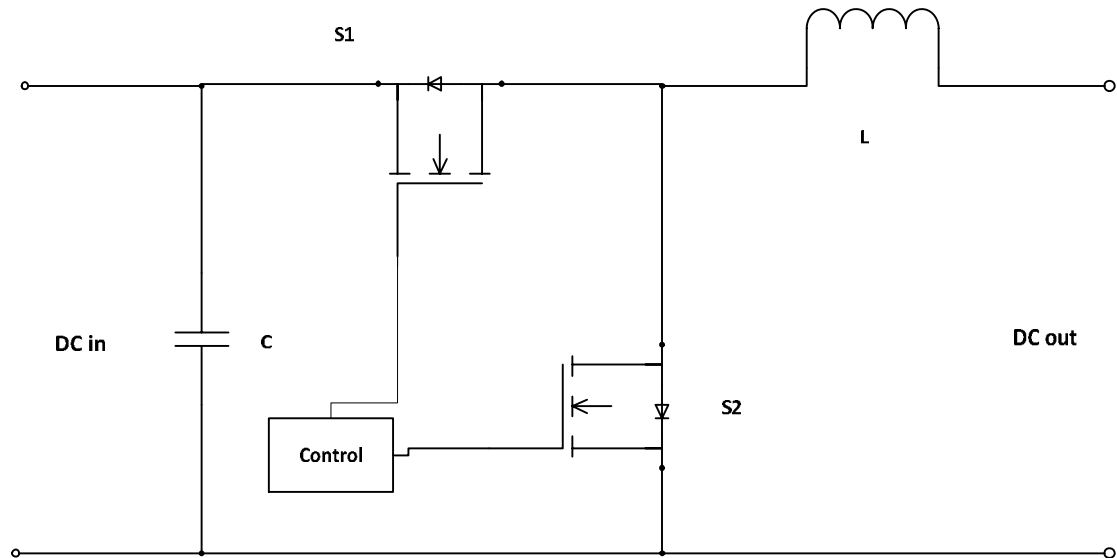
Aurinkopaneelien ja -paneelistojen tuottama tasajännite muunnetaan aurinkosähkövaihtosuuntaajalla vaihtojännitteeksi, jota valtaosa kotitalouksien ja teollisuuden sähkölaitteista ja -järjestelmistä käyttää. Vaihtosuuntaaja eli invertteri muuntaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi kytkiminä toimivilla puolijohdekomponenteilla.

Katkomalla tasajännitettä jaksollisesti saadaan aikaan vaihtojännite. Tasajännitteen katkominen pyritään tekemään niin, että syntynyt vaihtojännite sisältää merkittävänä taajuuskomponenttina sähköverkon taajuuden. Suodattamalla ylimääräisiä taajuuksia pois voidaan näin tuottaa spektriltään yleiseen sähköverkkoon kelpavaa sähköä. Kuvassa 5 esitetään aurinkosähkövaihtosuuntaajaan soveltuva vaihtosuuntauspiiri. Tässä kuvassa esitettävän kaltainen piiri tuottaa yksivaiheista vaihtosähköä.



Kuva 5. Aurinkosähkövaihtosuuntaajan vaihtosuuntauspiiri [4, s. 12]

Vaihtosuuntaajan tuottamaa jännitettä, samoin kuin sen paneeleista ottamaa virtaa ja jännitettä voidaan säätää DC-DC-muuntimilla, jotka koostuvat myös kytkiminä toimivista puolijohdekomponenteista. Kuvassa 6 (ks. seur. s.) esitetään DC-DC-muunnin:



Kuva 6. Aurinkosähkövaihtosuuntaajan DC-DC-muunnin [4, s. 12]

Kytkimen S1 kiinni- ja aukioloaikojen suhde ohjaa muuntimen ottamaa virtaa ja tuottamaa jännitettä. [4, s. 4–12.]

### 3.2.2 Aurinkosähkövaihtosuuntaajan häviöt

Vaihtosuuntaajan tehopuolihohteissa syntyy kytkentähäviöitä kytkennän aikana, lisäksi johtavassa tilassa syntyy häviöitä resistanssin vaikutuksesta ja mahdollisten kynnysjännitteiden vuoksi. Myös muissa komponenteissa voi syntyä häviöitä. Näin ollen todellisen vaihtosuuntaajan hyötysuhde ei voi olla 100 %. Paitsi invertterin sähköiset häviöt, myös MPPT-toiminnon epäideaalisuus laskevat aurinkosähkövoimalan hyötysuhdetta [4, s. 10].

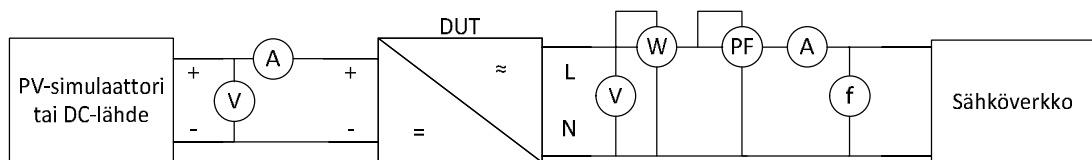
## 4 Aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen mittaus

### 4.1 Aurinkosähkövaihtosuuntaajien suorituskyvyn mittaus ja standardit

Aurinkosähkövaihtosuuntaajien suorituskykyä voidaan luonnehtia esimerkiksi hyötysuhteella (*efficiency*) ja MPPT-hyötysuhteella (*MPPT efficiency*). Aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen mittauksesta on julkaistu kaksi merkittävää kansainvälistä standardia. International Electrotechnical Commissionin standardi IEC 61683 määrää

aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen ja energiatehokkuuden mittauksesta. Eurooppalaisen CEN-standardisoimisjärjestön standardi EN 50530 määrää MPPT-hyötysuhteen mittauksesta.

Kuvassa 7 esitetään mittauskytkentä, jolla voidaan mitata sekä yleiseen sähköverkkoon kytkettäväksi tarkoitetun yksivaiheisen vaihtosuuntaajan hyötysuhde IEC 61683:n mukaisesti, että MPPT-hyötysuhde EN 50530:n mukaisesti. Kytkennässä testattava vaihtosuuntaaja on lohko DUT (*Device Under Test*). Mittalaitteet voivat olla erillisiä laitteita tai tehoanalysaattori tai jokin yhdistelmä näistä. Erilliset mittalaitteet olisivat virtamittari (A) ja jännitemittari (V) DC- ja AC-puolilla sekä AC-puolella taajuusmittari (f), AC-tehomittari ja tehokerroinmittari. Kolmivaiheisen aurinkosähkövaihtosuuntaajan mittauskytkentä on samanlainen DC-puolella kuin yksivaiheisen vaihtosuuntaajan. AC-puolella jokaisessa vaiheessa on samanlainen kytkentä kuin AC-puolella kuvassa 7.



Kuva 7. Mittauskytkentä aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhde- ja MPPT-hyötysuhdemittauksiin

Kytkenässä esitettyjen mittalaitteiden lisäksi voidaan tarvita mittalaitteita, joilla voidaan mitata säröä AC-puolella ja DC-jännitteen aaltoisuutta. [4, s. 11; 5, s 9].

## 4.2 Hyötysuhdemittaus standardin IEC 61683 mukaan

### 4.2.1 Aurinkosähkövaihtosuuntaajan hyötysuhteen määritelmä

Standardin IEC 61683 mukainen hyötysuhde on vaihtosuuntaajan antotehon ja otto-  
tehon suhde prosentteina. Ottoteho on DC-teho, ja antoteho on AC-pätöteho. Standardi määrittelee erikseen hyötysuhteen nimellisteholla (*rated output efficiency*) ja hyötysuhteen osateholla (*partial output efficiency*). Käytettävät nimellis- ja osatehot ovat aina antotehoja. [5, s. 8.]



#### 4.2.2 Mittausolosuhteet ja mitattavat suureet hyötysuhteen mittauksessa

Mittaukset suoritetaan standardin IEC 61683 mukaisesti lämpötilassa  $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Tulojännitteinä käytetään vaihtosuuntaajan valmistajan ilmoittamaa

- pienintä sallittua jännitettä
- nimellisjännitettä (*rated DC voltage*) tai toiminta-alueen keskimääräistä jännitettä sekä
- 90 % suurimmasta sallitusta jännitteestä.

Lähtöjännitteen tulee olla tehollisarvoltaan ja taajuudeltaan tutkittavan laitteen valmistajan antamien nimellisarvojen mukaista. Mittauksessa käytettävä DC-lähde on staattista tulojännitettä käyttävillä vaihtosuuntaajilla akku tai DC-vakiojännitelähde ja MPPT:tä käyttävillä laitteilla aurinkopaneeli tai aurinkopaneelia simuloiva DC-lähde. Hyötysuhde mitataan sähköverkkoon kytkettäväksi tarkoitetuilla inverttereillä kuormitustehoilla, jotka ovat 10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, ja 120 % nimellisestä näennäisantotehosta resistiiviseen kuormaan. Korostettakoon, että standardi todella vaatii mittauksen 120 %:lla nimellisestä näennäisantotehosta. Hyötysuhdetta määritettäessä mitattavat suureet ovat DC-puolella vähintään virta ja jännite ja AC-puolella virta, jännite, teho, tehokerroin ja taajuus. [5, s. 6–10.]

#### 4.3 MPPT-hyötysuhdemittaus standardin EN 50530 mukaisesti

##### 4.3.1 MPPT-hyötysuhteet ja mitattavat suureet

Standardi EN 50530 määrittelee staattisen ja dynaamisen MPPT-hyötysuhteen sekä kokonaishyötysuhteen (*overall efficiency*). Standardi määrää myös painotettujen hyötysuhteiden (*weighted efficiency*) mittauksesta staattisen muunnoshyötysuhteen (*conversion efficiency*) mittauksen yhteydessä. Staattinen muunnoshyötysuhde ja kokonaishyötysuhde voidaan määrittää staattisen MPPT-hyötysuhteen mittauksen yhteydessä. Staattisen muunnoshyötysuhteen määritelmä on käytännössä sama kuin IEC 61683:n mukaisen hyötysuhteen osateholla määritelmä paitsi, että osatehot ovat ottotehoja ja niiden suhde nimellistehoon on erilainen. Kokonaishyötysuhde on staattisen MPPT-hyötysuhteen ja tehonmuunnoshyötysuhteen tulo, toisin sanoen antotehon ja MPP-tehon suhde. [6.]

MPPT-hyötysuhde on tutkittavan laitteen DC-lähteestä ottaman energian suhde suurimpaan mahdolliseen tästä DC-lähteestä saatavissa olevaan energiaan tietyllä aikavälillä. Lähde voi olla aurinkopaneeli, aurinkopaneelisto tai muu DC-lähde, jonka ominaiskäyrä muistuttaa aurinkopaneelia tai -paneelista. Staattisessa MPPT-hyötysuhteessa maksimitehopiste pysyy vakiona ja dynaamisessa MPPT-hyötysuhteessa maksimitehopiste muuttuu. Näin ollen MPPT-hyötysuhde on suure, joka kuvaa aurinkosähkövaihtosuuntaajan kykyä löytää optimaalinen toimintapiste ja siten maksimaalinen teho vakiosäteilyllä (staattinen) ja muuttuvissa säteilyolosuhteissa (dynaaminen). [6, s. 8]

Staattinen MPPT-hyötysuhde saadaan yhtälöstä

$$\eta_{MPPTstat} = \frac{\sum_i U_{DC,i} I_{DC,i} \Delta T_i}{P_{MPP,PVS} \cdot T_M}, \quad (1)$$

missä

$U_{DC,i}$  on vaihtosuuntaajan näytteistetty tulojännite,

$I_{DC,i}$  vaihtosuuntaajan näytteistetty tulovirta,

$P_{MPP,PVS}$  on MPP-teho (MPP power),

$T_M$  on mittaukseen käytetty kokonaisaika

$\Delta T_i$  on näytteistysten välinen aika. [6, s. 8.]

Dynaaminen MPPT-hyötysuhde saadaan yhtälöstä

$$\eta_{MPPTdyn} = \frac{\sum_i U_{DC,i} I_{DC,i} \Delta T_i}{\sum_j P_{MPP,PVS,j} \Delta T_j}, \quad (2)$$

missä

$\Delta T_j$  on aika, jolloin MPP-teho  $P_{MPP,PVS,j}$  on saatavissa

$\Delta T_i$  on  $U_{DC,i}$ :n ja  $I_{DC,i}$ :n näytteistysaika. [6, s. 8]

Painotetun MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä lasketaan painotettu keskiarvo MPPT-hyötysuhteista eri olosuhteissa [6, s. 14]. Standardin mukaisesti määritetään eurooppalainen painotettu MPPT-hyötysuhde (European Weighted MPPT Efficiency) ja amerikkalainen California Energy Commissionin painotettu MPPT-hyötysuhde (CEC Weighted

MPPT Efficiency), jotka ovat eri tehotasoilla eri tavoin painotettuja staattisia MPPT-hyötysuhteita [6, s. 14]. Painotetut MPPT-hyötysuhteet voidaan laskea yhtälöstä 3

$$\eta_{MPPTstat,wtd} = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot \eta_{MPP_i}, \quad (3)$$

missä

$a_i$  on painokerroin

$\eta_{MPP_i}$  on staattinen MPPT-hyötysuhde tehotasolla  $MPP_i$ .

Tehotasot ja painokertoimet ovat taulukon 1 mukaiset.

Taulukko 1. Painotettujen hyötysuhteiden tehotasot ja painokertoimet [6, s. 28]

	Eurooppalainen painotettu MPPT-hyötysuhde		Kalifornialainen painotettu MPPT-hyötysuhde	
	Tehotaso $P_{MPP,PVS} / P_{DC,r}$	Painokerroin	Tehotaso $P_{MPP,PVS} / P_{DC,r}$	Painokerroin
$i$	$MPP_i$	$a_{EU_i}$	$MPP_i$	$a_{CEC_i}$
1	5 %	0,03	10 %	0,04
2	10 %	0,06	20 %	0,05
3	20 %	0,13	30 %	0,12
4	30 %	0,1	50 %	0,21
5	50 %	0,48	75 %	0,53
6	100 %	0,2	100 %	0,05

Taulukossa 1  $P_{DC,r}$  on vaihtosuuntaajan nimellinen (*rated*) DC-teho. Kuten taulukosta voitiin havaita, eurooppalainen painotus kohdistuu matalammille tehotasoille kuin kalifornialainen. Näin ollen eurooppalainen painotus kuvaa vaihtosuuntaajan suorituskykyä korkeammilla leveysasteilla ja pilvisessä ilmastossa, kun taas kalifornialainen painotus kuvaa suorituskykyä alueilla, jotka ovat matalammilla leveysasteilla, ja pilvisuus on vähäisempää. [6, s. 28.]

Standardi vaatii tallentamaan ajan funktiona seuraavat suureet kaikissa MPPT-hyötysuhdemittauksissa: MPP-teho  $P_{MPP,PVS}$ , DC-teho  $P_{DC}$ , MPP-jännite  $U_{MPP,PVS}$ , DC-jännite vaihtosuuntaajan syötössä  $U_{DC}$ , MPP-virta (*MPP current*)  $I_{MPP,PVS}$  ja DC-virta vaihtosuuntaajan syötössä  $I_{DC}$ . Näytteistys- ja tallennustaajuuksien on oltava sellaiset, että vaihtosuuntaajan MPPT-toiminnon käytös mukaan lukien syöttöjännitteen heilahtelu kaksinkertaisella verkkotaajuudella voidaan havainnoida.

#### 4.3.2 Aurinkopaneelistomallit MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä

Standardi EN 50530:2010 määrittelee kaksi matemaattista mallia ja parametrit niille aurinkopaneelistosimulaation ominaiskäyrien luomiseen. Käytettäessä malleja mittaus-  
ten suunnittelussa oletuksena on, että tunnetaan MPP-teho ja MPP-jännite sekä näiden perusteella MPP-virta standardiolosuhteissa. Toinen malleista on luvussa 3.1 mainitun aurinkokennon sijaiskytkennän tyyppinen yksidiodimalli, jolla saadaan ominaiskäyrät iteratiivisesti. Yksidiodimallissa virta on määritelty simuloitavan aurinkopaneeliston jännitteen ja virran funktiona lausekkeella, joka sisältää eksponenttifunktiota siten, että virta ei ole ratkaistavissa symbolisesti suljetussa muodossa.

Toinen aurinkopaneelistomalli, jonka standardi määrittelee mahdollistaa virran laskemisen ilman iteraatiota. Mallin parametrit ovat taulukossa 2:

Taulukko 2. EN 50530:2010:n aurinkopaneelistomallin parametrit ja laskennassa tarvittavat vakiot [5, s. 6–8; 6, s. 23–24]

Selite	Symboli	Kiteinen pii	Ohutkalvoteknologia	Toleranssi
Fill Factor, jännite	$FF_U$	0,8	0,7	< 1 %
Fill Factor, virta	$FF_I$	0,9	0,8	< 1 %
Teknologiariippuva korjauskerroin	$C_G$	$2,514 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$	$1,252 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$	
Teknologiariippuva korjauskerroin	$C_V$	$8,599 \cdot 10^{-2}$	$8,419 \cdot 10^{-2}$	
Teknologiariippuva korjauskerroin	$C_R$	$1,088 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{W}$	$1,476 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{W}$	
MPP-jänniteiden suhde säteilyvoimakkuuksilla $200 \text{ W/m}^2$ ja $1\,000 \text{ W/m}^2$	$V_{L2H}$	0,95	0,98	
Lämpötilakerroin	$\alpha$	0,04 %/°C	0,04 %/°C	±1 %
Lämpötilakerroin	$\beta$	-0,4 %/°C	-0,2 %/°C	
Korjauslämpötilatermi	$T_0$	-3 °C	-3 °C	
Säteilyvoimakkuuden vahvistuskerroin	$k$	$0,03 \text{ km}^2/\text{W}$	$0,03 \text{ km}^2/\text{W}$	
Aikavakio	$\tau$	300 s	300 s	
Säteilyvoimakkuus standardiolosuhteissa	$G_{STC}$	$1\,000 \text{ W/m}^2$	$1\,000 \text{ W/m}^2$	
Lämpötila standardiolosuhteissa	$T_{STC}$	25 °C	25 °C	± 2 °C

Niin sanottu *Fill Factor* jännitteelle on

$$FF_U = \frac{U_{MPP,STC}}{U_{OC,STC}}, \quad (4)$$

missä

$U_{MPP,STC}$  on MPP-jännite eli maksimitehon jännite standardiolosuhteissa ja  $U_{OC,STC}$  tyhjäkäyntijännite (*open circuit voltage*) standardiolosuhteissa. [6, s. 22.]

Vastaavasti *Fill Factor* virralle on

$$FF_I = \frac{I_{MPP,STC}}{I_{SC,STC}}, \quad (5)$$

missä

$I_{MPP,STC}$  on MPP-virta eli maksimitehon virta standardiolosuhteissa ja  $I_{SC,STC}$  on oikosulkuvirta (*short-circuit current*) standardiolosuhteissa [6, s. 22].

$I_{SC,STC}$  voidaan ratkaista yhtälön 5 perusteella, kun tunnetaan MPP-virta standardiolosuhteissa.

$$I_{SC,STC} = \frac{I_{MPP,STC}}{FF_I} \quad (6)$$

Yhtälöissä 7–13 symbolit, joita ei ole selitetty tekstissä, on selitetty taulukossa 2 (ks. ed. s.). Säteilyvoimakkuudesta riippuva virta (*irradiance dependent current*) on

$$I_0 = I_{SC,STC} (1 - FF_I)^{\frac{1}{1-FF_I}} \frac{G}{G_{STC}}, \quad (7)$$

missä  $G$  on säteilyvoimakkuus (*irradiance*) [6, s. 23].

Aurinkopaneelin lämpötila saadaan *Laplace*-tasossa yhtälöstä 8

$$T_{PV}(s) = T_{amb}(s) + T_0 + \frac{kG(s)}{1+\tau s}, \quad (8)$$

missä  $T_{amb}$  on ympäristön lämpötila [6, s. 23].

Säteilyvoimakkuudesta ja lämpötilasta riippuva oikosulkuvirta on

$$I_{SC} = I_{SC,STC} \frac{G}{G_{STC}} (1 - \alpha(T_{PV} - T_{STC})) \quad [6, \text{s. } 22]. \quad (9)$$

Ratkaistaan tyhjäkäyntijännite standardiolosuhteissa  $U_{OC,STC}$  yhtälöstä 4 (ks. s. 12):

$$U_{OC,STC} = \frac{U_{MPP:STC}}{FF_U} \quad (10)$$

Säteilyvoimakkuudesta ja lämpötilasta riippuva tyhjäkäyntijännite on

$$U_{OC} = U_{OC,STC} (1 + \beta(T_{PV} - T_{STC})) \left( \left( \ln \left( \frac{G}{G_{STC}} + 1 \right) \right) C_V - C_R G \right). \quad (11)$$

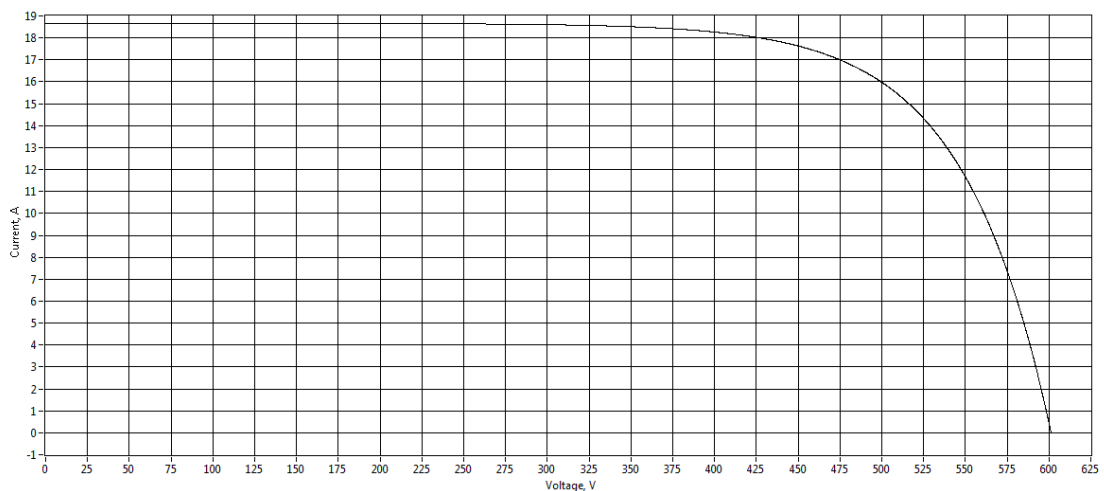
Aurinkopaneelien tuottama virta (*photovoltaic current*) saadaan yhtälöstä

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{U_{PV}}{U_{OC} C_{AQ}}} - 1 \right), \quad (12)$$

missä  $C_{AQ}$  on

$$C_{AQ} = \frac{FF_U - 1}{\ln(1 - FF_U)}. \quad (13)$$

Aurinkopaneeliston tuottama virta aurinkopaneeliston jännitteen funktiona muodostaa ominaiskäyrän. Kuvassa 8 on esimerkki tällaisesta ominaiskäyrästä. [6, s. 22–23.]



Kuva 8. Standardin EN 50530:2010 määrittelemän mallin mukainen ominaiskäyrä

Kuvan 8 (ks. ed. s.) käyrä on laskettu vastaamaan kiteisestä piistä tehdyn paneeliston ominaiskäyrää, jonka maksimitehopisteessä  $U_{MPP} = 480 \text{ V}$  ja  $P_{MPP} = 8\,080 \text{ W}$  säteilyvoimakkuudella  $1\,000 \text{ W/m}^2$  ja lämpötilassa  $25 \text{ °C}$ .

#### 4.3.3 Mittausolosuhteet staattisen MPPT-hyötysuhteen mittauksessa

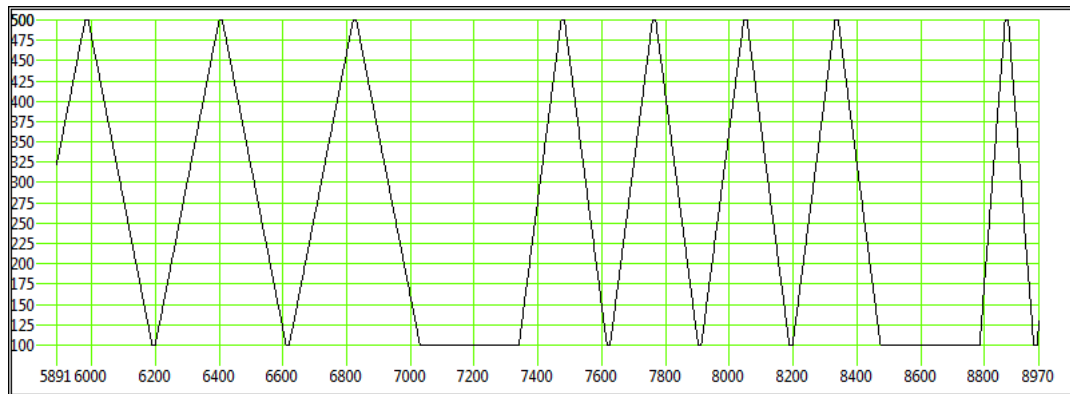
Mittaus suoritetaan samassa lämpötilassa kuin IEC 61683 -standardin mukaiset mittaukset, samoin lähtöjännitteiden osalta noudatetaan tätä standardia. Tutkittavan laitteen sisääntuloon kytketään aurinkopaneelisimulaattori, jonka on kyettävä jäljittelemään sekä kiteisestä piistä (*crystal silicon*) valmistettuja (c-Si) että ohutkalvotekniikalla (*thin film*, TF) toteutettuja aurinkopaneeleja.

Simuloitujen aurinkopaneelien MPP-jännitteinä käytetään molemmilla paneelityypeillä vaihtosuuntaajan valmistajan ilmoittamaa pienintä MPP-tulojännitettä (*minimum MPP voltage*), nimellistä (*rated*) MPP-tulojännitettä tai MPP-toiminta-alueen keskimääräistä jännitettä sekä c-Si -paneelien ominaiskäyrillä pienempää joko suurimmasta sallitusta MPP-jännitteestä (*maximum MPP voltage*) tai 80 % suurimmasta sallitusta jännitteestä ja TF-paneelien ominaiskäyrillä pienempää joko suurimmasta sallitusta MPP-jännitteestä tai 70 % suurimmasta sallitusta jännitteestä. Käytettävät MPP-tehot ovat 5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 %, 75 % ja 100 % DC-nimellistehosta. [6, s. 9–11.]

#### 4.3.4 Mittausolosuhteet dynaamisen MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä

Dynaaminen MPPT-hyötysuhde mitataan samoissa ympäristöolosuhteissa kuin IEC 61683:n mukaiset mittaukset. Kuten staattisen MPPT-hyötysuhteen mittauksessakin, vaihtosuuntaajaan syötettävä tasasähkö tuotetaan aurinkopaneelistosimulaattorilla. Simulaattori tuottaa maksimitehopisteessä vaihtosuuntaajan DC-nimellisjännitteellä DC-nimellistehon kun simuloitu säteilyvoimakkuus on  $1\,000 \text{ W/m}^2$  ja lämpötila on  $25 \text{ °C}$ . [6, s. 11.]

Mittauksessa aurinkopaneelistosimulaattorin ominaiskäyrä muuttuu ajan funktiona kun simuloitua säteilyvoimakkuutta varioidaan. Kuvassa 9 (ks. seur. s.) nähdään esimerkki siitä, kuinka säteilyvoimakkuutta muutetaan dynaamisen MPPT-hyötysuhteen määrittämisessä. Vaaka-akselilla on aika sekunteina ja pystyakselilla on säteilyvoimakkuus ( $\text{W/m}^2$ ). [6, s. 17–20.]



Kuva 9. Säteilivoimakkuuden muutoksia dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittauksessa

Dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittaus koostuu kolmesta osasta,

1. pienet ja keskiuuret säteilivoimakkuudet 100–500 W/m<sup>2</sup>,
2. keskiuuret ja suuret säteilivoimakkuudet 300–1 000 W/m<sup>2</sup> ja
3. käynnistys- ja alasajotesti hitailla nostoilla ja laskuilla 10–100 W/m<sup>2</sup>.

Kaikki osat koostuvat alkuodotuksesta matalammalla säteilivoimakkuudella sekä yhdestä tai useammasta sarjasta nosto-pito-lasku-pito-yhdistelmiä ja odotuksia. Nostot (*ramp up*) ja laskut (*ramp down*) ovat aina samassa yhdistelmässä toistensa peilikuvia, välissä on aina pito (*dwell*) ja kaikki odotukset ovat 300 s. Käynnistys- ja alasajotestissä on vain odotus ja yksi hidas nosto (980 s), pito (30 s), lasku (980 s) ja pito (30 s). Muissa osissa on useita sarjoja nosto-pito-lasku-pito-yhdistelmiä ja odotuksia siten, että yhdistelmien määrää sarjassa varioidaan, samoin nosto- ja laskuaikoja pitojen ollessa 10 s. Dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittauksen säteilivoimakkuudet ja ajoitukset esitetään liitteessä 1. [6, s. 17–20.]

#### 4.4 Ohjelmoitavat DC-lähteet ja aurinkopaneelistosimulaatio

Auringon maanpinnalle asti tuleva säteilivoimakkuus ei ole vakio, ohjattavissa eikä täysin ennustettava. Suurten säteilivoimakkuuksien saavuttaminen ei ole mahdollista korkeilla leveysasteilla talvella. Tämän vuoksi hyötysuhdemittauksissa käytetään ohjelmoitavia DC-lähteitä tai hehkulampuilla valaistuja aurinkopaneeleita. Koska jälkimmäiset vaativat suuritehoisia vaihtosuuntaajia testattaessa paljon tilaa ja hehkulamput



paljon tehoa, on kustannustehokkuussyistä käytettävä tehoelektroniikkaan perustuvia ohjelmoitavia DC-lähteitä [4, s. 77].

MPPT-hyötysuhdetta mitattaessa standardin EN 50530 mukaisesti aurinkopaneelistsimulaattorin on toteutettava luvussa 4.3.3 mainitut ominaiskäyrät tarkasti, etenkin suureiden  $U_{OC}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $P_{MPP}$ ,  $FF_U$  ja  $FF_I$  osalta. Standardin mukaan aurinkopaneelistsimulaattorin on dynaamisten ominaisuuksiensa puolesta selvittävä vaihtosuuntaajan MPPT-algoritmin kanssa, minkä voidaan tulkita tarkoittavan sitä, että ominaiskäyrät pysyvät oikeellisina, eikä synny oskillaatioita, joita ei syntyisi aurinkopaneelien kanssa. [6, s. 16.]

## 5 Automatisoitu mittausjärjestelmä

### 5.1 Kehitetyn mittausjärjestelmän synty ja yleispiirteet

#### 5.1.1 Mittausjärjestelmän pääosat

Toteutetun automatisoidun mittausjärjestelmän pääosat ovat tarvittaessa aurinkopaneelistsimulaattorina toimiva ohjelmoitava DC-lähde, tehoanalysointilaite sekä mittauksen ohjausohjelmistoa ja työkaluohjelmia ajava PC-tietokone. Tietokoneohjelmisto on toteutettu National Instrumentsin LabView-ohjelmointiympäristöllä. DC-lähteen konfigurointi ja ajonaikainen ohjaus suoritetaan ohjausohjelmiston DC-lähdeajurin kautta. Ohjelmiston tehoanalysointilaite konfiguroi tehoanalysointilaitteen sekä lukee ja tallentaa analysointilaitteelta saadun mittausdatan.

Järjestelmä tarvitsee lisäksi riittävän tehokkaan kolmivaiheisen sähkönsyötön DC-lähteelle ja kuormaksi keinoverkon tai sähköverkon, joka kykenee ottamaan vastaan invertterin antotehon eikä häiritse invertterin toimintaa.

#### 5.1.2 Mittausjärjestelmän synty

Tietokoneohjelmiston lähtökohtana on Metropolia Ammattikorkeakoulun opiskelijaryhmän keväällä 2012 tekemä ohjelmisto, joka koostui käyttöliittymästä, DC-lähdeajurista eri valmistajan DC-lähteelle (Magna-Power Electronics TS III), analysointilaitteesta, mittauksen ohjausmoduulista sekä tulostenlaskentamoduulista. Ohjelmisto

on työn myötä kirjoitettu suurelta osalta uudelleen, koska alkuperäisessä versiossa ei ollut MPPT-hyötysuhteen mittausta ja haluttiin tuki toiselle DC-lähteelle johtuen TS III:n stabiiliusongelmista. TS III:n antama jännite heilahteli voimakkaasti etenkin ominaiskäyrillä, mikä vaikeutti hyötysuhdemittausta. Näin ollen katsottiin paremmaksi vaihtoehdoksi käyttää DC-lähteenä Regatron TopConia.

DC-lähdeajuri on perustaltaan toisenlainen, se on tehty eri laitteelle ja huomattavasti laajempi kuin opiskelijaryhmän tekemä ajuri. Analysaattoriajurin rajapinta analysaattorin suuntaan on sama kuin alkuperäisessä, samoin analysaattorin kanssa tapahtuva tietoliikenne, mutta mittausdatan käsittely on toteutettu toisin, jotta voitaisiin tehdä myös MPPT-hyötysuhdemittauksia. Mittauksen ohjausmoduuli ja tulostenlaskenta-moduuli on toteutettu täysin uudestaan.

### 5.1.3 Mittausjärjestelmän käyttö standardien mukaisissa mittauksissa

Automatisoituun mittausjärjestelmään on toteutettu täysi tuki IEC 61683:n mukaisen hyötysuhteen mittauksen toteuttamista varten. Samoin järjestelmä tukee EN 50530:n mukaista staattisen MPPT-hyötysuhteen mittausta ja EU- ja CEC-painotettujen MPPT-hyötysuhteiden mittausta. Dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittaukselle on osittainen tuki. Tämä mittaus voidaan suorittaa ja tulokset laskea, mutta järjestelmä ei tuota automaattisesti standardin mukaista konfiguraatiota DC-lähteelle, vaan ominaiskäyrien MPP-arvot ja käyrältä toiselle siirtyminen pitää laskea järjestelmän ulkopuolella.

Täyttä tukea dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittaukselle ei ole voitu toteuttaa ajanpuutteen vuoksi. Lisäksi standardin EN 50530:2010 aurinkopaneelistomalliin saattaa tulla muutoksia standardin seuraavassa versiossa juuri lämpötilan vaikutuksen osalta, joten pidettiin järkevänä odottaa tältä osin uutta standardia [7].

## 5.2 Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmisto

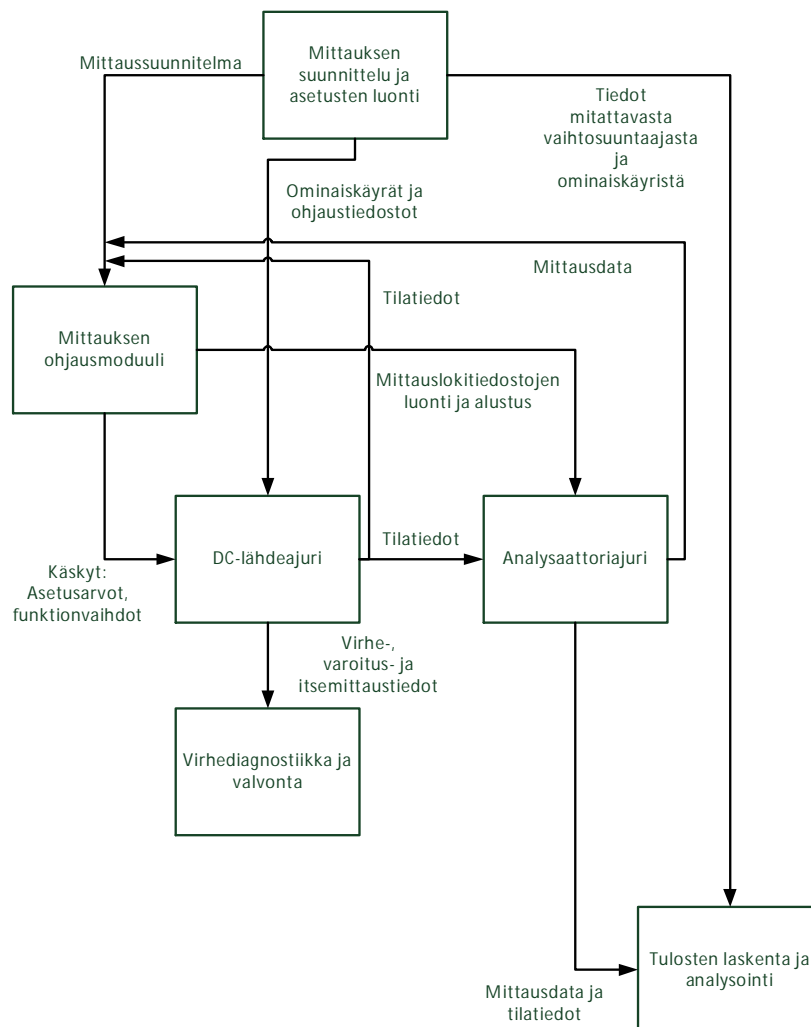
### 5.2.1 Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston rakenne

Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston osat ovat mittauksen ohjausohjelmisto ja työkaluohjelmistot. Ohjausohjelmisto koostuu DC-lähdeajurista, analysaattoriajurista ja mittauksen ohjausmoduulista. Työkaluohjelmilla voidaan tuottaa mittausasetukset ja

aurinkopaneelistosimulaatioissa tarvittavat  $I(U)$ -ominaiskäyrät ja arvioida niiden laatua sekä analysoida ja visualisoida mittaustulokset.

Laiteajureita ja mittauksen ohjausohjelmia ajetaan rinnakkain omissa säikeissään mittauksen aikana. DC-ajurin aurinkopaneelistosimulaatiotoiminto toimii reaaliaikaisena tarkasti määritellyllä ajastuksella, jotta dynaaminen MPPT-mittaus olisi mahdollinen, muiden ohjausohjelmiston osien toiminta ei ole tarkasti synkronoitua, vaan ohjaukset ja mittaukset tehdään tietokoneen nopeuden sallimissa rajoissa.

Tulosten analysointiohjelmalla voidaan laskea hyötysuhteet ja tutkia mittaustuloksia sekä tallentaa tulokset ja laskentaan ja tuloksiin liittyvä data selkeässä muodossa jatko-analyysijä ja tulosten esittämistä varten. Ohjelmiston rakenne ja tärkeimmät tietovirrat esitetään kuvassa 10:



Kuva 10. Mittausjärjestelmän ohjelmiston rakenne ja tärkeimmät sisäiset tietovirrat

Ohjelmisto on toteutettu LabVIEW 2011:llä. Kaikki numeerinen data luetaan ja tallennetaan CSV-muodossa, joten se on luettavissa ja editoitavissa yleisimmillä taulukkolaskentaohjelmilla ja matemaattisilla ohjelmistoilla.

### 5.2.2 Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston kehitystyö

Ohjelmiston kehitys aloitettiin tutustumalla standardeihin ja aiemmin tehtyyn työhön sekä käytettävissä oleviin laitteisiin. Tutustumisen jälkeen tehtiin luvussa 5.1.2 mainittu päätös Regatron TopConin käyttämisestä järjestelmän DC-lähteenä ja siten aurinkopaneelistosimulaattorina. Tämän päätöksen seurauksena, ja koska laitteelle ei ollut valmiita LabVIEW-ajureita, aloitettiin sellaisen kehittäminen TopConille C-ohjelmointikielen kanssa käytettäväksi tarkoitetun ohjelmointirajapinnan avulla, joka tuotiin LabView'hun aliohjelmakirjastojen tuontitoiminnolla. Kun TopCon-ajurin toteutus oli pääosiltaan tehty, muokattiin analysaattoriajuria siten, että sen toiminta olisi standardin EN 50530 mukaista. Tämän jälkeen toteutettiin mittauksen ohjausmoduulia, mittaasetusten luontiohjelmaa ja tulostenlaskentaohjelmaa rinnakkain DC-lähdeajurin jatkokehityksen kanssa.

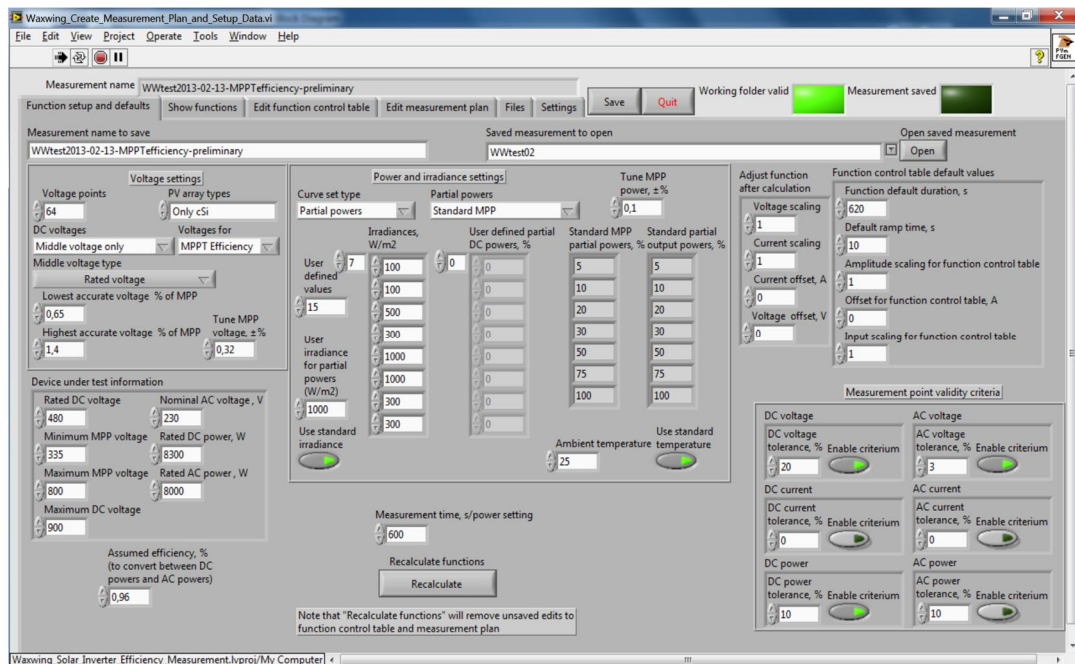
Koska mittausjärjestelmään kuuluvat laitteet ovat kalliita, eikä Regatron TopConia voida käyttää normaaleissa toimisto-olosuhteissa, ohjelmistoa ei voinut kokeilla täysipainoisesti kuin laboratoriossa. Kehitystyön helpottamiseksi osa laitteiston käsittelystä ohitettiin ohjelmallisesti hyödyntäen LabVIEW'n *conditional disable structure*ita.

### 5.2.3 Mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelma

Mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelmalla voidaan luoda mittaussuunnitelma sekä tarvittavat ominaiskäyrät ja asetustiedostot hyötysuhteen ja staattisen MPPT-hyötysuhteen mittauksiin käyttäjän antamien tietojen perusteella. Käyttäjän syöte koostuu tutkittavan vaihtosuuntaajan teknisistä tiedoista, halutun mittauksen tyypistä ja muista mittaukseen liittyvistä asioista, kuten mittauksen oikeellisuuskriteereistä.

Oikeellisuuskriteerit koostuvat joukosta suureita, jolle voidaan määrätä hyväksyttävä arvo ja toleranssit, kuinka paljon suureen mitattu arvo saa poiketa hyväksyttävästä arvosta. Esimerkiksi vaihtosuuntaajan ulostulossa olevalle AC-jännitteelle voidaan määrätä kriteeri, jotta voidaan havaita verkkohäiriöt ja hylätä näiden aikana mitatut tulokset.

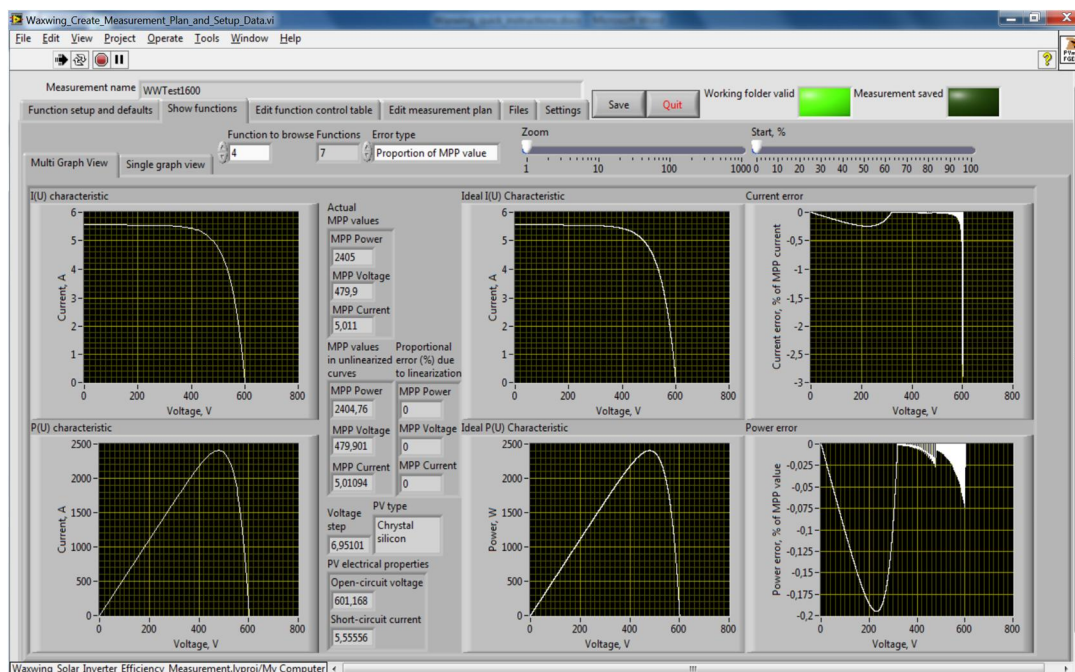
Kuvassa 11 nähdään mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelman tietojensyöttövälilehti (*Function setup and defaults*):



Kuva 11. Mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelma, tietojen syöttö

Kohtaan *Adjust function after calculation* voidaan syöttää jännitteen ja virran korjauskertoimia sekä korjaustermejä kompensoimaan mahdollista DC-lähteen jännitteen ja virran systemaattista virhettä, joka voi johtua siitä, että DC-lähteen säädön perusteena oleva mittaus ei ole kalibroitu.

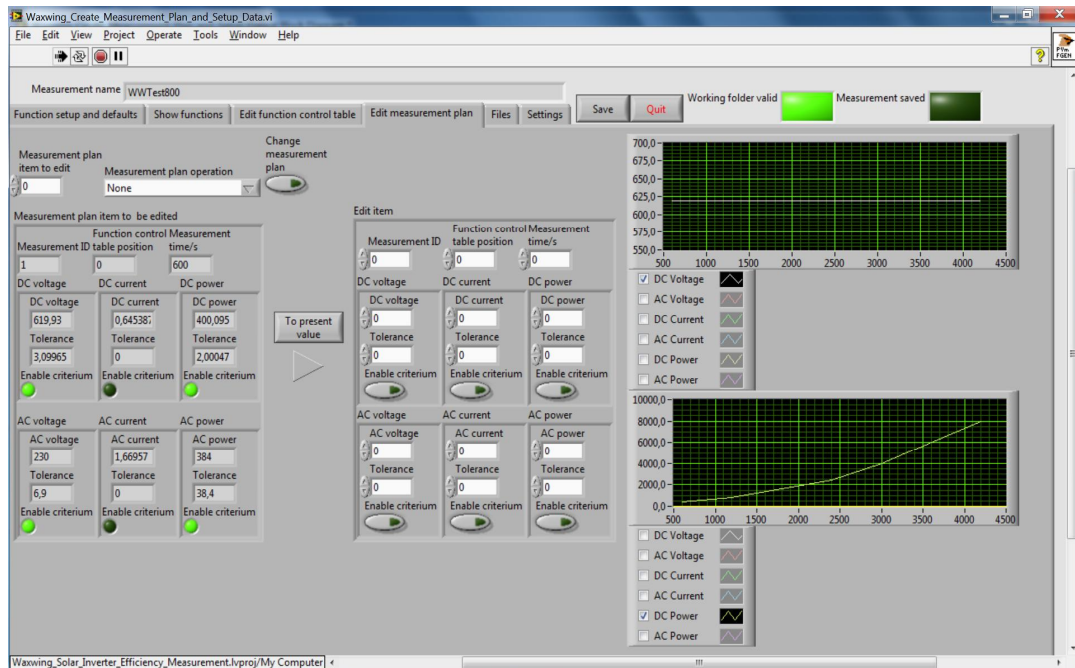
Ohjelman luoma  $I(U)$ -ominaiskäyrä on joukko pisteitä. Ohjelmoitava DC-lähde, josta enemmän luvussa 5.3, interpoloi lineaarisesti pisteistä ominaiskäyrän. Näin ollen todellinen käyrä on epätarkka pisteiden välissä. Jotta tätä epätarkkuutta sekä käyrien laskennan epätarkkuutta voitaisiin arvioida, ohjelmaan syötettyjen tietojen perusteella luotuja ominaiskäyriä voidaan tarkastella graafisesti. Kuvassa 12 (ks. seur. s.) nähdään ominaiskäyrien selausvälilehti (*Show functions*):



Kuva 12. Ominaiskäyrien selausvälilehti

Ylempi käyrä vasemmalla on todellinen, linearisoitu  $I(U)$ -ominaiskäyrä. Keskimäinen käyrä ylärivissä on linearisoimaton  $I(U)$ -ominaiskäyrä ja oikeanpuoleinen käyrä on virran linearisointivirhe. Alarivillä ovat vastaavat käyrät teholle. Välilehdellä on kuvaajien lisäksi tietoa ominaiskäyrästä. Alivälilehdellä *Single Graph View* on suurempi kuva todellisesta tai ideaalisesta ominaiskäyrästä tai todellisen ominaiskäyrän linearisointivirheestä (voidaan valita mikä tahansa kuudesta *Multi Graph View*'n kuvaajasta). Käyrien yläpuolella on tutkittavan käyrän valitsin, ominaiskäyrien lukumäärän ilmaisimien ja liukusäätimet, joilla voi suurentaa ja vierittää kuvaa.

Mittaussuunnitelma voi käsittää kokonaisen standardin mukaisen mittaussarjan tai osan siitä tai käyttäjän määrittelemän mittauksen tai mittaussarjan. Luotua mittaussuunnitelmaa voidaan muokata samoin kuin aiemmin tallennettuja mittaussuunnitelmia. Mittaussuunnitelmaan voidaan lisätä mittauksia, siitä voidaan poistaa mittauksia tai niitä voidaan muuttaa. Kuvassa 13 (ks. seur. s.) nähdään mittaussuunnitelman muokausvälilehti:



Kuva 13. Mittaussuunnitelman muokkausvälehti

#### 5.2.4 Mittauksen ohjausohjelmisto

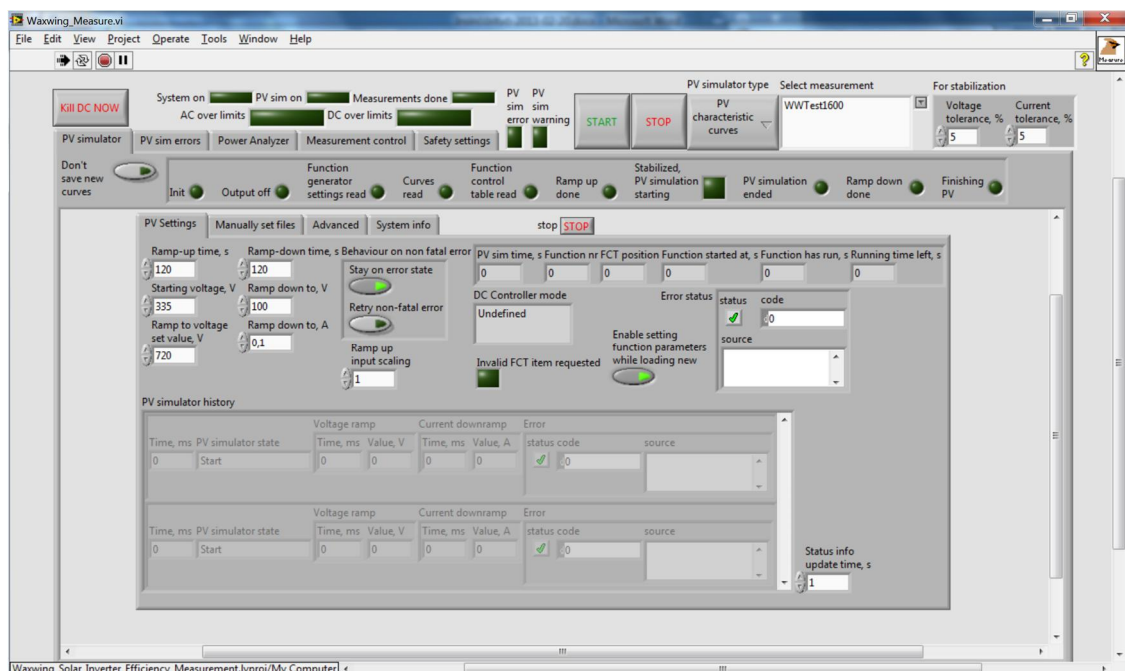
Mittauksen ohjausohjelmisto on modulaarinen siten, että laiteriippuvaliset osat (analyysaattori- ja DC-lähdeajurit) kommunikoivat muiden osien kanssa (mittauksen ohjausmoduuli sekä työkaluohjelmistot) laiteriippumattomasti määriteltyjen rajapintojen kautta. Rajapintojen laiteriippumattomuus mahdollistaa tuen lisäämisen muille DC-lähteille ja mittalaitteille ilman tarvetta muuttaa ohjausohjelmiston muita osia. Rajapinnat koostuvat LabVIEW'n globaaleista muuttujista, tekstimuotoisista asetustiedoista sekä CSV-tiedoista.

DC-lähdeajurin toteutus on ollut suurin yksittäinen tehtävä työssä. Ajuri on toteutettu LabVIEW'lla laitevalmistajan C/C++ -ohjelmointikirjastoon perustuen ja sen toimintoihin kuuluvat

- yhteyden muodostaminen DC-lähteeseen
- ohjaus staattiseen DC-tilaan tai funktiogeneraattoritilaan
- virta- ja jänniteasetusarvojen asettaminen
- funktioiden vaihtaminen ja muokkaaminen funktiogeneraattoritilassa

- hallittu jännitteen ja virran nosto ja laskeminen sekä
- DC-lähteen toiminnan valvominen.

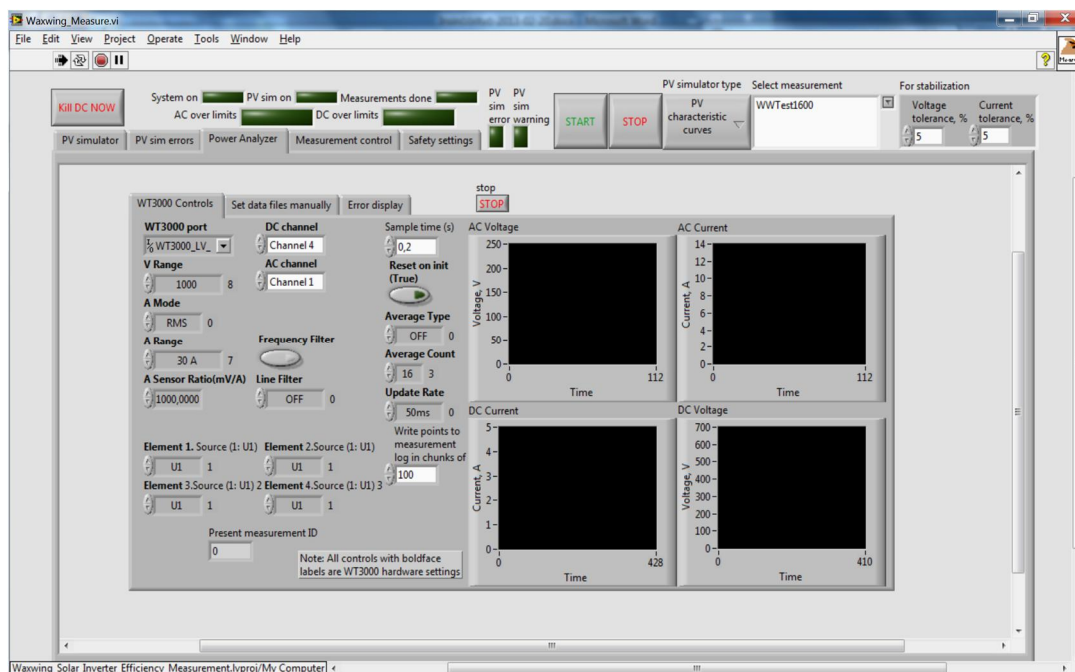
DC-lähdeajurin käyttöliittymä koostuu kolmesta virtuaali-instrumentista. Yksi on tarkoitettu DC-lähteen staattisen DC-tilan käyttämiseen, toinen funktiogeneraattorin käyttämiseen ja kolmas näyttää DC-lähteen virheilmoitukset ja jännite-, virta- ja tehotiedot DC-lähteestä. DC-lähdeajurin ajonaikainen rajapinta muuhun ohjelmistoon koostuu globaaleista muuttujista, joiden kautta ajuri viestii etenkin funktiogeneraattorin tilasta ja saa käskyjä mittauksen ohjausmoduulilta. Kuvassa 14 esitetään mittauksen ohjausohjelmiston ikkuna:



Kuva 14. Mittauksen ohjausohjelmisto, DC-lähdeajurin käyttöliittymä

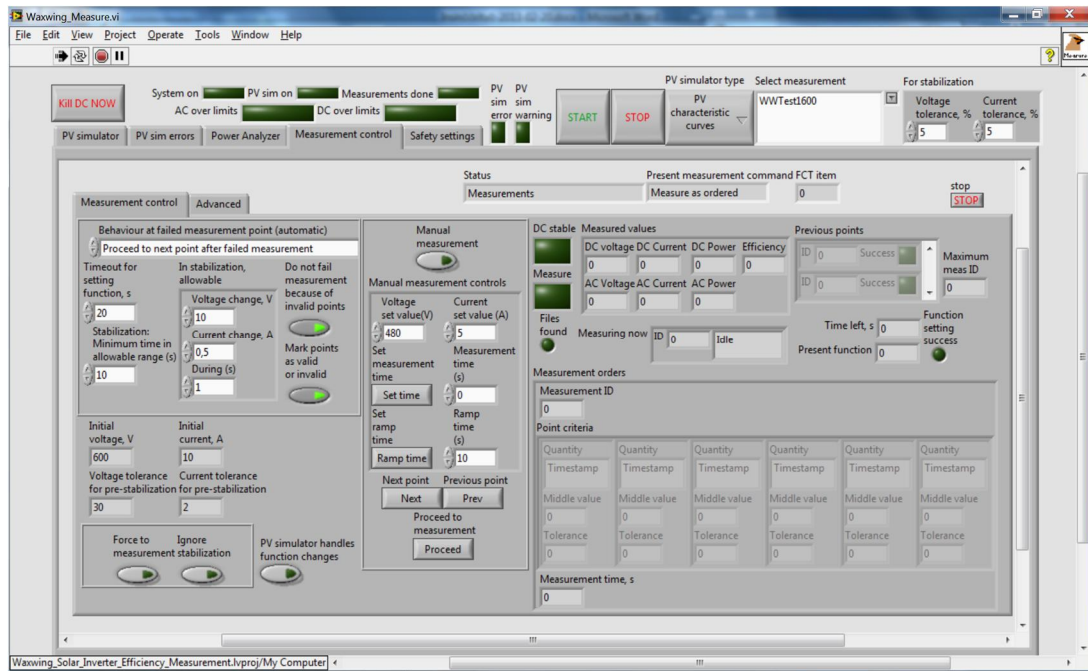
Analysaattoriajuri lukee mittausdatan tehoanalysaattorilta, laskee hetkelliset hyötysuhteet ja tallentaa sen millisekunteina ilmaistuilla aikaleimoilla varustettuna CSV-tiedostoon. Analysaattoriajuri seuraa myös DC-lähdeajurin antamia tietoja DC-lähteen tilasta ja tallentaa nämä tiedot CSV-tiedostoon. Ajuri antaa mittausdatalle tunnistetiedot mittauksen ohjausmoduulin ohjauksen mukaisesti. Kuvassa 15 (ks. seur. s.) esitetään analysaattoriajurin käyttöliittymä:





Kuva 15. Mittauksen ohjausohjelmisto, analyysaattoriajurin käyttöliittymä

Mittauksen ohjausmoduuli alustaa analyysaattorin lokitiedostot ja ohjaa DC-lähdeajuria. Ohjausmoduuli lukee mittaussuunnitelman ja antaa sen perusteella tarvittavat käskyt analyysaattoriajurille ja DC-lähdeajurille. Analyysaattoriajuri saa ohjausmoduulilta käskyt merkitä mittauspisteen tunnistetiedot ja kriteerienmukaisuus mittauslokeihin. DC-lähdeajuri saa käskyt asetusarvojen muutoksista ja ominaiskäyrien vaihtamisesta. Mittausta voidaan myös ohjata käsin. Staattisen MPPT-hyötysuhteen mittaus on mahdollista suorittaa täysin automaattisesti, mikäli ominaiskäyrät ovat tarkkoja, mutta hyötysuhteen mittauksessa IEC 61683:n mukaisesti tarkka ulostuloteho joudutaan asettamaan käsin. Mittauksen ohjausmoduulissa ei ole automaattista tehonsäätöä, koska aikaa sen toteutukseen ja testaukseen ei ollut. Mittauksen ohjausmoduulin käyttöliittymä esitetään kuvassa 16 (ks. seur. s.):

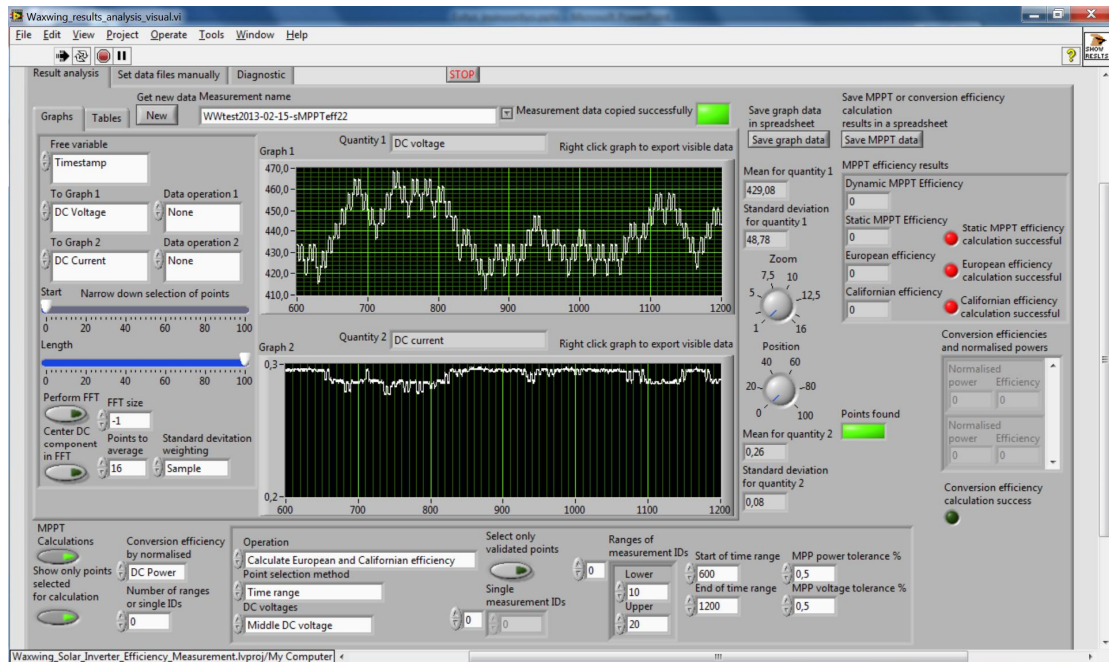


Kuva 16. Mittauksen ohjausohjelmisto, mittauksen ohjausmoduulin käyttöliittymä

### 5.2.5 Tulosten laskentaohjelma

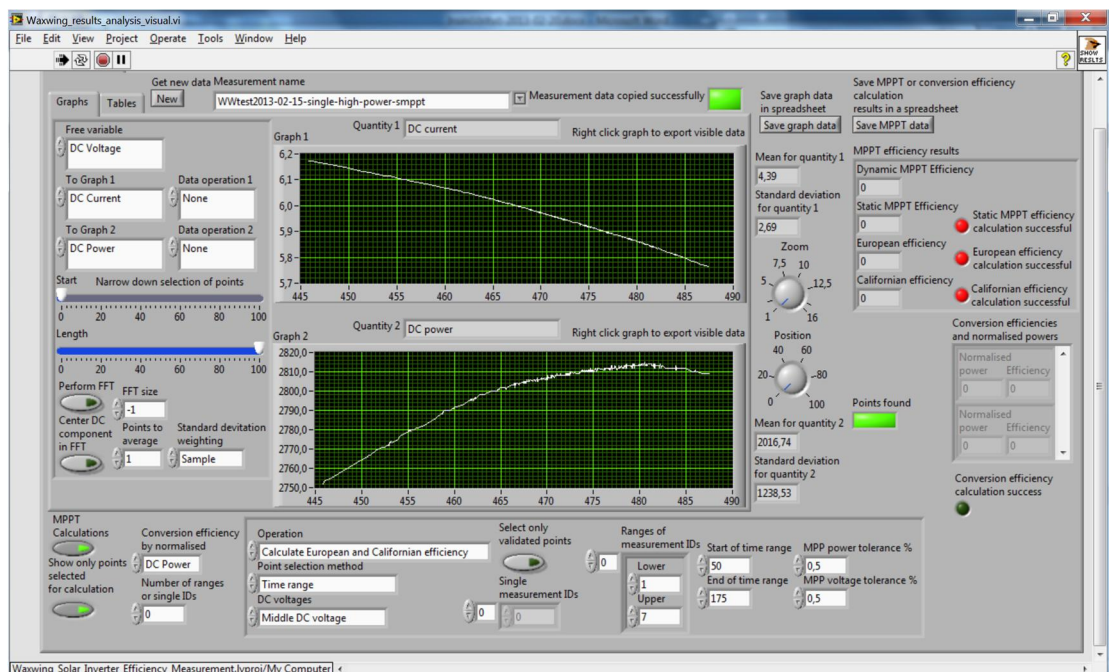
Tulosten laskentaohjelmalla voidaan laskea hyötysuhteet ja MPPT-hyötysuhteet, tutkia mittaustuloksia graafisesti ja tallentaa laskenta- ja mittaustuloksia luettavassa muodossa. Mittauspistejoukko, josta hyötysuhteet ja MPPT-hyötysuhteet lasketaan, voidaan rajata aikaleiman tai mittauksen tunnisteiden perusteella sekä sillä perusteella, onko piste merkitty oikeelliseksi.

Graafiset esitykset ja taulukot ovat kopioitavissa Windows-ympäristössä leikepöydälle. Kuvassa 17 (ks. seur. s.) esitetään tulosten laskentaohjelman käyttöliittymä. Muita toimintoja mittausdatan käsittelyyn ovat keskiarvoistus ja FFT (nopea, numeerinen Fourier'n muunnos). Kuvaajien ja dataoperaatioiden vapaat ja riippuvat muuttujat ovat vapaasti valittavissa. Jokainen suure voidaan esittää mittaustulosten perusteella minkä tahansa suureen funktiona. Kuvaajia voidaan rajata ja suurentaa vapaan muuttujan suunnassa.



Kuva 17. Tulosten laskentaohjelma

Tulosten laskentaohjelmalla voidaan esimerkiksi myös arvioida aurinkopaneelisto-simulaattorin ominaiskäyrän oikeellisuutta. Kuvassa 18 esitetään mittausten perusteella muodostetut  $I(U)$ - ja  $P(U)$ -ominaiskäyrät.



Kuva 18. Tulosten laskentaohjelma, mitattu ominaiskäyrä

### 5.3 Mittausjärjestelmässä käytettävä DC-lähde

Järjestelmässä käytettävä DC-lähde syöttää staattista tasajännitettä/virtaa vaihtosuuntaajalle tai toimii aurinkopaneelisimulaattorina. Mittauksen ohjausjärjestelmään on tehty laiteajuri Regatron AG:n Regatron TopCon -mallisille ohjelmoitaville DC-lähteille. Laiteajuri alustaa yhteyden TopConiin ja konfiguroi sen joko tavanomaiseksi virta- tai jännitelähteeksi tai aurinkopaneelisimulaattoriksi.

Regatron TopCon pystyy mallista riippuen tuottamaan tasajännitteitä, jotka ovat jopa 1,2 kV/yksikkö. Laite kykenee tuottamaan sähkötehoa kymmeniä kilowatteja (10–32 kW/yksikkö). Useita yksiköitä voidaan kytkeä sarja- tai rinnankytkentään siten, että yksi *master*-yksikkö ohjaa yhtä tai useampaa *slave*-yksikköä, jolloin saadaan jopa yli 1 MW:n tehoja. Näin ollen voidaan testata vaihtosuuntaajia laajalla tehoalueella. [8].

TopConin virta- ja jännitesäätö toimivat rinnakkaisina PID-säätiminä [9]. Laitetta voidaan käyttää tavanomaisena virta- tai jännitelähteenä. Tällöin TopConiin asetetaan asetusrvot virralle ja/tai jännitteelle sekä tehoraja [10]. Asetusarvoille voidaan myös ohjelmoida ajan funktioita funktiogeneraattoritulassa. Aurinkopaneelistosimulaatiota varten laitteeseen voidaan funktiogeneraattoritulassa ladata erilaisia ominaiskäyriä, jotka voivat olla virran, jännitteen tai tehon relaatioita toistensa kanssa [11].

Ominaiskäyrältä toiselle siirtyminen voidaan suorittaa liukuvasti siten, että siirrytään lineaarisesti interpoloiden määrätyn ajan kuluessa ominaiskäyrältä toiselle [11]. Kyseessä on niin kutsuttu ramp-toiminto. Järjestelmässä käytettävät ominaiskäyrät ovat jännitteen funktioita virran suhteen. Kun vaihtosuuntaaja muuttaa DC-lähteestä otta- maansa virtaa, tämä johtaa jännitteenmuutokseen DC-lähteen ulostulossa. Muuttuneen jännitteen perusteella DC-lähde muuttaa virran asetusrvoa ominaiskäyrän mukaisesti.

### 5.4 Mittausjärjestelmässä käytettävä tehoanalysaattori

Tehoanalysaattori mittaa aurinkosähkövaihtosuuntaajan sisäänmenosta ja ulostulosta sähköisiä suureita, tärkeimpinä DC-jännite, -virta ja -teho sisäänmenossa ja AC-jännite, -virta ja -teho sekä tehokerroin ja taajuus ulostulossa.

Mittauksen ohjausjärjestelmään on tehty laiteajuri Yokogawa Electric Corporationin Yokogawa WT3000:lle. WT3000 on tarkkuustehoanalysaattori, jolla voidaan mitata tasa- ja vaihtovirtoja 1 kV:n jännitteisiin ja 30 A:n virtoihin asti, ulkoisilla antureilla jopa suurempia virtoja ja jännitteitä.

Yokogawa WT3000:n toiminta perustuu jännitteen ja virran hetkellisarvojen näytteistykseen ja haluttujen suureiden laskentaan näihin perustuen digitaalista signaalinkäsittelyä hyödyntäen. [12, s. 2-2, 12-1.]

### 5.5 Mittaaminen automatisoidulla mittausjärjestelmällä

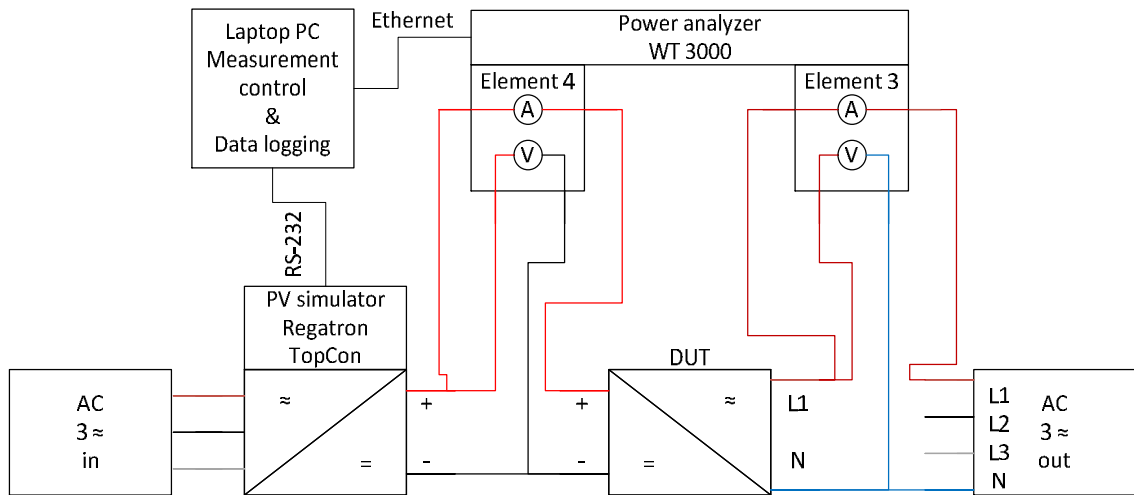
Automatisoitu hyötysuhdemittaus voidaan suorittaa standardin IEC 61683 mukaisesti tai standardista poiketen siten, että MPPT-toiminnolla varustetun vaihtosuuntaajan mittauksessa käytetään staattista DC-lähdettä eikä ominaiskäyriä. Kaikissa mittauksissa työn kulku on yleisellä tasolla sama:

- Rakennetaan mittauskytkentä.
- Tarkistetaan mittauskytkennän oikeellisuus.
- Syötetään testattavan laitteen tiedot ja muut tarvittavat asetukset ohjelmistolle, joka luo mittausasetukset ja -suunnitelman.
- Tarkistetaan mittausasetusten ja -suunnitelman oikeellisuus.
- Suoritetaan mittaukset.
- Lasketaan ja analysoidaan tulokset ohjelmistolla. Staattinen MPPT-hyötysuhdemittaus suoritetaan standardin EN 50530 mukaisesti.

### 5.6 Mittausjärjestelmässä käytettävä mittauskytkentä

Kuvassa 19 (ks. seur. s.) on automatisoidun mittauksen mittauspiiri yksivaiheiselle vaihtosuuntaajalle (kuvassa merkitty DUT). Mittauspiiriä voidaan käyttää sekä hyötysuhteen että MPPT-hyötysuhteen mittauksissa. Aurinkopaneelistosimulaattorin (kuvassa merkitty *PV simulator*) ottama teho saadaan kolmivaihesyötöstä (lohko AC 3 ~ in) sähköverkosta. Aurinkopaneelistosimulaattori syöttää ohjelmointinsa mukaista DC-tehoa vaihtosuuntaajalle, joka muuntaa ottamansa tasasähkön vaihtosähköksi (230 V,

50 Hz), joka syötetään sähköverkon yhteen vaiheeseen suoraan tai muuntajan kautta tai sähköverkon sijasta keinoverkkoon.



Kuva 19. Yksivaiheisen vaihtosuuntaajan mittauspiiri

Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan mittauksessa käytetään muutoin samanlaista mittauspiiriä, mutta vaihtosuuntaajaa ei usein kytketä nollaan ja vaiheet L2 sekä L3 kytketään tehoanalysaattorin elementteihin 2 ja 1.

Kaapeloinnin on oltava mittauksessa käytettäville virroille soveltuvaa. 8 kW:n nimellistehoisella vaihtosuuntaajalla AC-kaapelointi on vähintään 6 mm<sup>2</sup>:n kuparikaapelia ja DC-kaapelointi on vähintään 2,5 mm<sup>2</sup>:n kuparikaapelia. Mittauksen suorittamiseksi turvallisesti kaapelien liitokset on tehtävä koteloituina.

## 6 Automatisoidun mittausjärjestelmän testaus

### 6.1 Testauksessa käytetyt mittauskytkennät

Järjestelmää testattiin kehitysvaiheessa enimmäkseen luvussa 5.6 olevan kuvan 19 mukaisella mittauskytkennällä. Muutamia kokeiluja tehtiin pelkällä DC-lähteellä ilman vaihtosuuntaajaa tai tehoanalysaattoria. Yksi sarja kokeiluja tehtiin myös ilman tehoanalysaattoria, mutta käyttäen vaihtosuuntaajaa. Testeissä käytettiin erilaisia aurinkosähkövaihtosuuntaajia, nimellisteholtaan 3,3–12 kW. Kaikki käytetyt vaihtosuuntaajat olivat prototyypilaitteita.

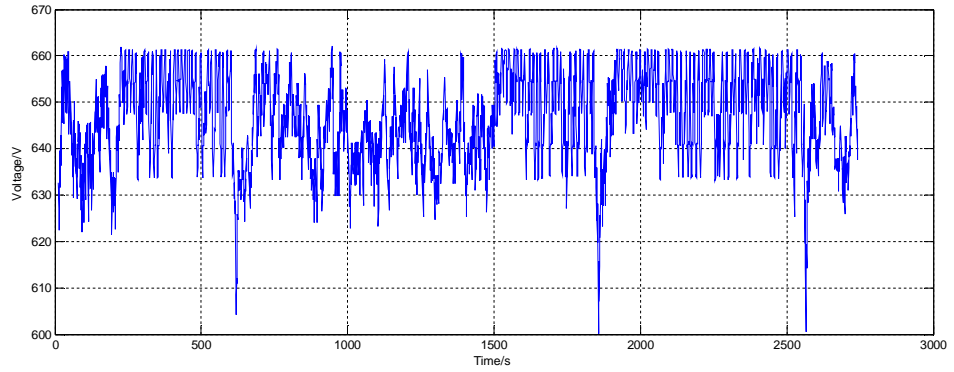
## 6.2 Automatisoidun mittausjärjestelmän testauksen tulokset

### 6.2.1 Mittausjärjestelmän alustavat toimintakokeilut

Ensimmäisissä kokeiluissa alkusyksyllä 2012 pyrittiin selvittämään, toimiiko kehitetty DC-lähdeajuri. Näissä kokeiluissa ei vielä käytetty järjestelmän lopullista käyttöliittymää vaan tarvittavat toiminnot suoritettiin käynnistämällä alemman tason VI:t käsin. 20.9.2012 suoritetuissa kokeissa saatiin alustettua ja muodostettua yhteys neliyksikköiseen Regatron TopConiin ja saatiin asetettua jännitteen ja virran asetusarvoja. Staattisella DC:llä saatiin syötettyä tehoa 8 kW:n prototyypivaihtosuuntaajaan. Ongelmia aiheuttivat ohjelmointivirheet, jotka saatiin korjattua. Vaihtosuuntaajaan toiminnan käynnistymisessä oli myös ongelmia, jotka saattoivat johtua laitteisto-ongelmista. Käynnistymisongelmia pyrittiin ratkaisemaan jännitteen asetusarvon hallitulla nostamisella, koska arvioitiin, että vaihtosuuntaaja saattaa sulkea sisääntulon suojataukseen itseään ylivirroilta.

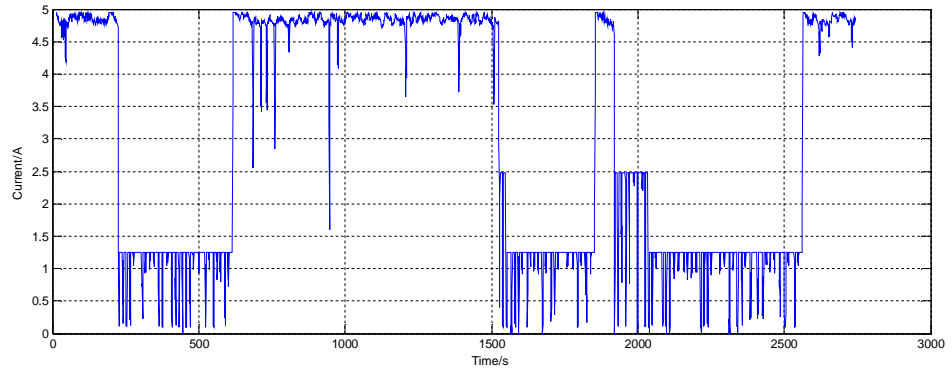
Ominaiskäyrien käyttöä kokeiltiin jo tässä vaiheessa, mutta kokeilut eivät onnistuneet, koska ei tiedetty, miten päästä funktiogeneraattoritulassa hallitusti toimintapisteeseen. Myöhemmin, kokeiluissa 1.–5.10.2012 saatiin funktiogeneraattoritulassa tehoa DC-lähteestä, mutta jännite joko nousi hallitsemattomasti 1 000 V:n tai pysyi lähes nollassa myöhemmin paljastuneen ominaiskäyrien syöttötoiminnon ohjelmointivirheen vuoksi. Hallitsematon jännitteen nousu ei rikkonut analysaattoria eikä DC-lähdettä. Lisäksi ominaiskäyrät olivat väärentyypisiä, tyyppiä  $U(I)$  eli jännite virran funktiona, kun yleisesti käytetään tyyppiä  $I(U)$  eli virta jännitteen funktiona.

Testeissä 10.10.2012 saatiin ajettua DC-lähdeajurin virta- ja jänniteasetusarvot asettavilla VI:llä DC-jännite ylös ja saatiin 8 kW:n aurinkosähkövaihtosuuntaaja toimimaan pitkäkestoisesti ja vaihtosuuntaajan tulon ja lähdön sähköiset suuret voitiin mitata ja mittaustulokset tallentaa analysaattoriajurin lokitustoiminnon avulla. Kuvassa 20 (ks. seur. s.) esitetään DC-jännite vaihtosuuntaajan sisääntulossa:



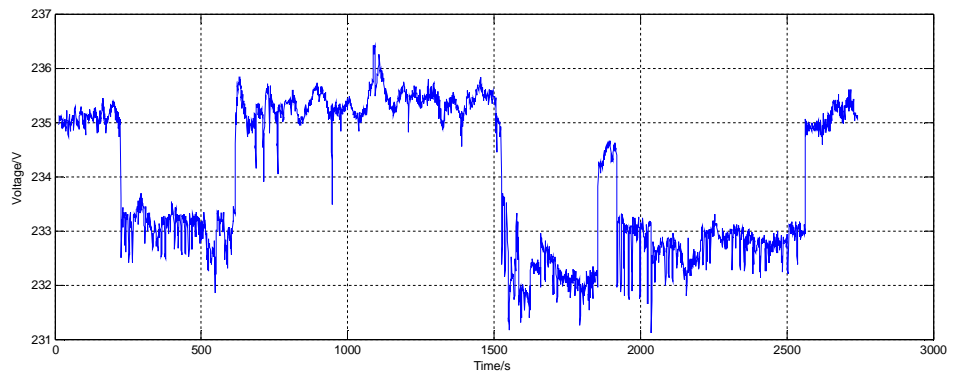
Kuva 20. DC-jännite 8 kW:n vaihtosuuntaajan sisääntulossa staattisilla DC-asetusarvoilla

Kuvassa 21 esitetään DC-virta samasta mittauksesta:



Kuva 21. DC-virta 8 kW:n vaihtosuuntaajan sisääntulossa staattisilla DC-asetusarvoilla

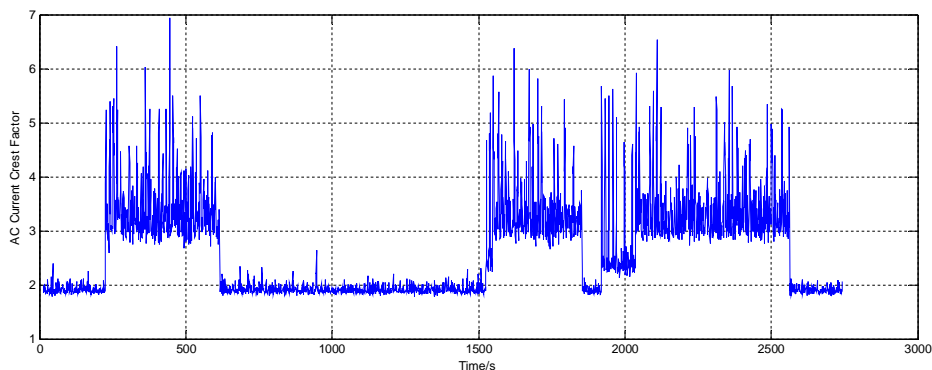
Kuvassa 22 esitetään AC-jännite samasta mittauksesta:



Kuva 22. AC-jännite 8 kW:n vaihtosuuntaajan ulosmenossa staattisilla DC-asetusarvoilla



Kuvassa 23 esitetään AC-virran huippuarvon ja keskiarvon suhde:



Kuva 23. AC-virran huippuarvon ja keskiarvon suhde 8 kW:n vaihtosuuntaajan ulosmenossa staattisilla DC-asetusarvoilla

Näin ollen voitiin todeta, että järjestelmä kykenee asettamaan Regatron TopConiin staattisia asetusarvoja ja mittaamaan vaihtosuuntaajan sisäänmenossa ja ulostulossa.

#### 6.2.2 Ominaiskäyrien toimintaan saattamiseen johtavat testit

Ominaiskäyrien toimintaan saattamiseen johtavissa testeissä 22.–23.10.2012 oli käytössä laitevalmistajan ohjeiden perusteella korjattu versio DC-lähdeajurista ja ominaiskäyrät olivat virran funktioita jännitteen suhteen. DC-lähteen käyttäytyminen säilyi kuitenkin muuttumattomana, joko tehoa ei saatu tai DC-jännite nousi hallitsemattomasti. Tutkimalla DC-lähteen muistiin ladattuja ominaiskäyriä voitiin todeta, että käyrien muuntamisessa laitteen käyttämälle asteikolle (0–4 000, missä 4 000 on suurin sallittu arvo kullekin suureelle) oli virhe, jonka tuloksena virran arvot olivat joko negatiivisia tai yli sallitun arvon. Virhe löydettiin testeissä 24.10.2012, joissa käytössä oli vain DC-lähde. Tällöin todettiin, että ominaiskäyrien latauksessa ohjelmointivirheen vuoksi virran ja jännitteen arvot olivat menneet ristiin. Kun virhe oli löydetty, se voitiin korjata. Koska käytössä ei ollut kuormaa DC-lähteelle, ei toimintaa voitu testata.

Vastaavasti testeissä 22.–23.11.2012 testattiin korjatulla ajurilla, johon oli lisätty aikariippuvaan funktioon perustuva toimintapisteen nosto käynnistyksessä. Testeissä käytettiin 12 kW:n prototyyppivaihtosuuntaajaa, mutta ei tehoanalysointia. Nosto oli ongelmallinen, aikariippuvien funktioiden latauksessa DC-lähteelle oli vakava ohjelmointivirhe, jonka tuloksena asetusarvot putosivat välillä nolnaan.

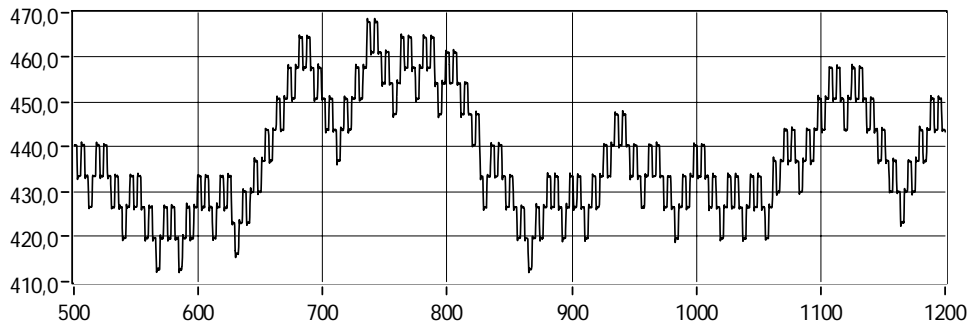
Seuraavaksi testeissä 26.11.2012 jatkettiin ongelmien selvittämistä. Regatronin TopControl-ohjelmistolla DC-lähteeseen tallennettuja funktioita tutkittaessa todettiin, että ominaiskäyrien ovat oikeellisia, mutta aikariippuvien käyrien olevan virheellisiä. Kokeillessa aikariippuvia käyriä löydettiin erään testaajan neuvon perusteella tapa nousta ominaiskäyrälle ja todettiin tavan toimivuus käyttämällä TopControl-ohjelmistoa.

### 6.2.3 Mittausjärjestelmän lopputestaus

Lopputesteissä testattiin koko järjestelmää 14.–15.2.2013. DC-lähdejuri oli muokattu nousemaan ominaiskäyrälle testeissä 26.11.2012 neuvotulla tavalla (ks. 6.2.2). Mittauksen ohjausmoduuli oli ensimmäistä kertaa käytössä. 14.2.2013 ongelmia aiheutti 8 kW:n prototyyppivaihtosuuntaaja, jota ei saatu toimimaan, kun DC-lähteessä käytettiin ominaiskäyriä, vaihtosuuntaaja ei lähtenyt ottamaan virtaa kuin hetkellisesti. Jännite ei kuitenkaan käyttäytynyt enää hallitsemattomasti, eikä virta ollut kuin muutamia ampeereja.

15.2.2013 käytettiin 3,3 kW:n prototyyppivaihtosuuntaajaa, joka saatiin käynnistymään ongelmitta ominaiskäyrillä. Ongelmaksi muodostui DC-ajurin epävakaus.  $I(U)$ -ominaiskäyrät saatiin ladattua DC-lähteen muistiin ja ensimmäinen ominaiskäyrä saatiin käynnistymään, mutta ominaiskäyrän asetusten muuttaminen tai toiseen ominaiskäyrään vaihtaminen johti lähes varmasti DC-ajurin kaatumiseen. Analysaattoriajuri toimi DC-ajurin kaatumisesta huolimatta, mutta kaatumisen jälkeisissä uudelleenkäynnistyksissä yhteys analysaattoriin jouduttiin alustamaan uudelleen NI Measurement & Automation Explorerilla. Epävakaudesta huolimatta saatiin mittaustuloksia, jotka osoittivat tarkasteltaessa niitä tulosten laskentaohjelmalla, että DC-lähde voi toimia aurinkopaneelistosimulaattorina ja mittaustulokset voidaan tallentaa. Kuvassa 24 (ks. seur. s.) esitetään jännite ajan funktiona, kun DC-lähde toimii aurinkopaneelistosimulaattorina matalan tehotason ominaiskäyrällä.

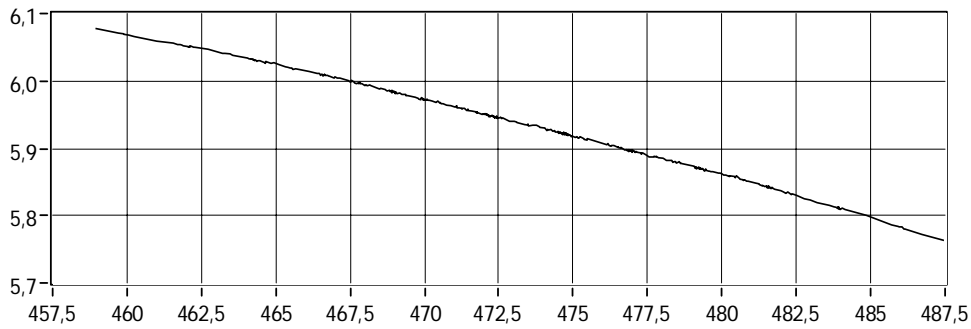
Graph 1



Kuva 24. Aurinkopaneelistosimulaattorilla syötetyn vaihtosuuntaajan DC-jännite (V) ajan (s) funktiona

Kuvassa 25 esitetään mitattu virta jännitteen funktiona, kun DC-lähteessä käytetään korkeamman tehotason ominaiskäyrää.

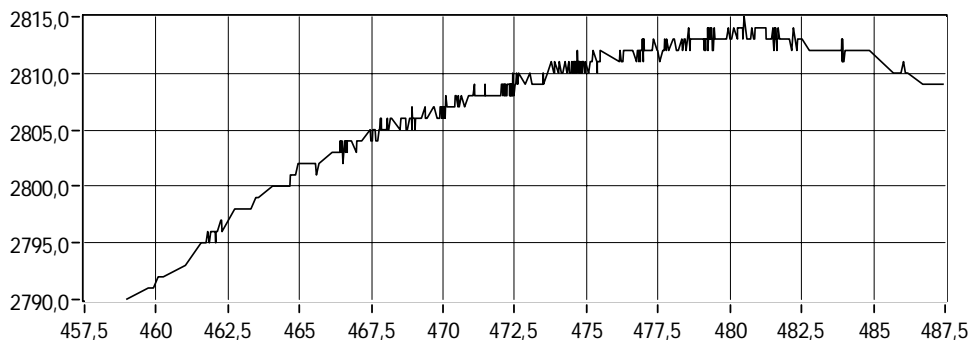
Graph 1



Kuva 25. Aurinkopaneelistosimulaattorilla syötetyn vaihtosuuntaajan DC-virta (A) DC-jännitteen (V) funktiona

Kuvassa 26 esitetään mitattu teho jännitteen funktiona samalla ominaiskäyrällä.

Graph 2



Kuva 26. Aurinkopaneelistosimulaattorilla syötetyn vaihtosuuntaajan DC-teho (W) DC-jännitteen (V) funktiona

Testauksessa ei ehditty testata järjestelmän käytettävyyttä kunnolla käyttäen testaajaa, jolle järjestelmä ei olisi entuudestaan tuttu. Näin ollen ei voitu arvioida, onko järjestelmä helppokäyttöinen, ja parantaako se testaajan työn tuottavuutta. Testauksen yhteydessä havaittiin kuitenkin käytettävyysongelmaksi epävakauden lisäksi ainakin se, että ohjelmisto ja DC-lähde täytyy käynnistää uudelleen toiminnan varmistamiseksi, kun mittaukset on tehty, mikäli halutaan suorittaa uusia mittauksia. Lisäksi oikean mittaussuunnitelman valinta mittauksen ohjausohjelmistossa ennen mittauksen käynnistystä havaittiin asiaksi, joka on helppo unohtaa.

## **7 Automatisoidun mittausjärjestelmän kehityksen tulosten arviointi**

### **7.1 Mittausjärjestelmän laitteiston toiminta ja valmistajan tuki**

Mittausjärjestelmän laitteisto toimi teknisesti moitteettomasti. Kaikki testauksessa ja mittauksissa esille tulleet järjestelmän ongelmat liittyivät konfigurointiin ja ohjelmistongelmiin, ohjelmointivirheisiin tai puuttuviin tietoihin laitteiston toiminnasta. DC-lähteestä ei ollut aluksi käytettävissä tarpeeksi tietoa, mutta sitä saatiin valmistajalta pyydettyä helposti. Näin ollen voidaan todeta, että laitteiston luotettavuus ei ole ongelma ainakaan käytetyillä tehoilla ja virroilla, jotka rajoittuivat muutamaan kilowattiin. DC-lähteen ja tehoanalysaattorin valmistajien antamien teknisten tietojen mukaan huomattavasti suurempien tehojen ja virtojen käyttö olisi mahdollista. Tätä ei kuitenkaan voitu testata. Sen sijaan voitiin todeta, että käytetyt laitteet kestävät maksimijännitteensä 1 000 V ainakin lyhytaikaisesti.

### **7.2 Mittausjärjestelmän tietokoneohjelmiston toiminta**

#### **7.2.1 DC-lähdeajurin luotettavuusongelmat**

DC-lähdeajuri pystyy asettamaan staattisia jännite- ja virta-asetuksia. Myös funktio-generaattoritilaan siirtyminen onnistuu, ominaiskäyrät voidaan ladata virheettömästi TopConin muistiin. DC-lähdeajurin aurinkopaneelistosimulaatiotilassa havaittiin vakavia luotettavuusongelmia. Ohjelmisto kaatui hyvin usein nimenomaan testattaessa järjestelmää laboratoriossa. Ohjelmistoa kehitettäessä ilman laitteistoa toimisto-olosuhteissa kaatumiset olivat merkittävästi harvinaisempia kuin laboratoriossa. Syynä tähän lienee

se, että ohjelmoinnin helpottamiseksi laitteistoa vaativien osien toiminta estettiin LabVIEW'n *conditional disable structure*illa, joihin voitiin myös määrittää vaihtoehtoinen toiminnallisuus korvaamaan laitteistosta saatava data. Kaatumiset ajoittuivat lähinnä ominaiskäyrän vaihtamisen läheisyyteen, jolloin paitsi aktivoidaan TopConissa ominaiskäyrä, myös annetaan tälle asetukset, jotka ovat 19 muuttujaa sisältävässä tietorakenteessa, jonka käsittelyssä saattaa olla ongelmia.

TopCon-ajurin ajastettu pääsilmutta oli ongelmallinen, ohjelmointiympäristö raportoi toistuvasti virhetoiminnasta VI:ssa, jossa kyseinen ajastettu silmutta sijaitsee. Kerran havaittiin myös ilmiö, jossa globaalin muuttujan, joka oli tyyppiä Boolean (arvo tosi tai epätosi), muutokset eivät enää näkyneet VI:lle.

### 7.2.2 Ohjelmiston muun osan toiminta

Ohjelmistossa on myös muita pienempiä virheitä ja sen helppokäyttöisyys on avoin kysymys. Mittausasetukset ja ominaiskäyrät pystytään luomaan hyötysuhde- ja staattisiin MPPT-hyötysuhdemittauksiin.

Mittauksen ohjausmoduuli pystyy lukemaan mittaussuunnitelman ja toimimaan sen mukaisesti. Käsiohjausta ei testattu. Ohjausmoduuliin ei toteutettu ajan puutteesta johtuen automaattista tehonsäätöä. Tämän oletetaan olevan haitaksi IEC 61683:n mukaisen hyötysuhdemittausten suorituksessa, koska niissä tulee käyttää standardin määrittämiä antotehotasoja. Näitä tehotasoja ei voi asettaa mittauksen suunnitteluvaiheessa tuntematta etukäteen hyötysuhdetta eri tehoilla ja jännitteillä, koska antoteho määräytyy ottotehon ja hyötysuhteen mukaan.

Mittausdatan lukeminen analysaattorilta ja sen tallentaminen toimii. Jännitteet, virrat ja tehot saadaan tallennettua virheettää. Analysaattoriajurin laskemissa hetkellisissä hyötysuhteissa on mahdollista tulla hylättäviä arvoja jos AC-teho on liian lähellä nollaa. Aloitettaessa mittaukset uudelleen tietokoneohjelmiston kaatumisen jälkeen yhteys tehoanalysaattoriin saattaa kadota.

Tulosten laskentaohjelma toimii ainakin tulosten graafisen esittämisen sekä taulukko-  
muotoisten tulosesitysten luomisen osalta. MPPT-hyötysuhteiden laskentaa ei ehditty testata riittävästi, jotta voitaisiin osoittaa laskentatulosten oikeellisuus.

### 7.3 Hyötysuhdemittausjärjestelmän kehitystyön tavoitteiden toteutuminen

Työssä tavoitteena oli kehittää automatisoitu mittausjärjestelmä aurinkosähkövaihtosuuntaajien hyötysuhteen sekä staattisen ja dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittaamiseen standardien IEC 61683 ja EN 50530 mukaisesti helpottamaan testaajien työtä ja kasvattamaan työn tuottavuutta. Työssä saatiin kehitettyä laitteistotasolla luotettava automatisoitu mittausjärjestelmä hyötysuhteen ja staattisen MPPT-hyötysuhteen mittaukseen, mutta järjestelmän tietokoneohjelmisto ei ole luotettava eikä helppokäyttöisyttä, eikä työn tuottavuuden kasvua tai työn helpottumista voitu todistaa. Havaittujen ohjelmistovirheiden ja ohjelmiston puutteiden korjaaminen on kuitenkin mahdollista ja virheiden korjaamisen jälkeen on mahdollista niin haluttaessa testata järjestelmän hyödyllisyys.

Tärkeimpien ongelmien eli ohjelmistovirheiden ja työn viivästymisen yhtenä syynä oli se, että laitteistoa ei voinut kokeilla täydessä mitassa kuin laboratorio-olosuhteissa. Toinen syy oli se, että kehitystyö ei ollut riittävän järjestelmällistä ja hyvin dokumentoitua, muutamissa kohdissa suunnittelua olisi kannattanut tehdä selkeämmin *top-down* ja suunnitella ennen toteuttamaan lähtemistä tietyt osat tilakoneina. Kolmas kehitysvaiheen ongelmaryhmä oli eräiden testeissä käytettyjen prototyypivaihtosuuntaajien tekniset ongelmat, jotka ymmärrettiin vasta melko myöhään. Lisäksi työtä olisi ehkä kannattanut rajata tiukemmin. Tulosten analysointiohjelman olisi voinut toteuttaa aluksi suppeampana.

### 7.4 Automatisoidun hyötysuhdemittausjärjestelmän jatkokehitys

Järjestelmää voidaan kehittää edelleen. Tärkein kehitettävä asia on ohjelmiston luotettavuus. Järjestelmän on pystyttävä suorittamaan täydellinen standardinmukainen mittaus kaatumatta. Toinen kehityskohde on automaattinen tehonsäätö ja ominaiskäyrien automaattisempi säätö oikeellisiksi. Kolmas kehityskohde on järjestelmän käytettävyydestä ja kehittämisen helppokäyttöiseksi käyttäjäpalautteen perusteella.

Tuki dynaamisen MPPT-hyötysuhteen määrittämiselle vaatii mittauksen suunnittelu- ja asetusten luontiohjelman kehitystyötä, jotta saadaan luotua automaattisesti riittävän tarkat ominaiskäyrästä ja ajastus- ja skaalaustaulukot, jotta ominaiskäyrien ajalliset muutokset voitaisiin toteuttaa aurinkopaneelistosimulaattorissa.

## 8 Yhteenveto

Aurinkoenergian käyttö on lisääntynyt ympäri maailmaa. Hyvä hyötysuhde on tärkeä aurinkosähköjärjestelmissä sekä ympäristöllisistä että taloudellisista syistä. Hyötysuhteen mittaaminen standardien IEC 61683 ja EN 50530 mukaisesti on koettu työn tilanteessa yrityksessä työlääksi. Näin ollen haluttiin toteuttaa automatisoitu hyötysuhdemittausjärjestelmä yleiseen sähköverkkoon kytkettäväksi tarkoitetuille aurinkosähkövaihtosuuntaajille. Työ perustui opiskelijaryhmän tekemään työhön, jota muokattiin ja laajennettiin. Suurimpana yksittäisenä tehtävänä tässä työssä oli ajurin toteuttaminen eri DC-lähteelle (Regatron TopCon), kuin mitä opiskelijaryhmä oli käyttänyt. Syynä eri DC-lähteen käyttämiseen oli etenkin se, että Magna-Power Electronicsin TS III:n tuottaman sähkön laatu todettiin huonoksi sovelluksessa.

Hyötysuhdemittausjärjestelmä koostuu LabVIEW:lla tuotetusta tietokoneohjelmistosta, jota ajetaan PC-tietokoneella, tarkkuustehoanalysointilaitteesta, DC-lähteestä ja sähköverkosta tai keinoverkosta testattavan laitteen kuormana sekä tarvittavasta kaapeloinnista. Ohjelmistolla voidaan suunnitella mittaukset ja luoda mittaasetukset, suorittaa mittaukset ja analysoida sekä tallentaa luettavassa muodossa mittaustulokset. DC-lähde tuottaa tasasähköä staattisilla asetusarvoilla tai toimii aurinkopaneelistosimulaattorina. Jälkimmäinen on vaatimuksena kaikille standardinmukaisille hyötysuhdemittauksille, kun vaihtosuuntaajassa on MPPT-toiminto. Tehoanalysointilaitteet mittaavat kaikki sähköiset suureet.

Hyötysuhdemittausjärjestelmän laitteiston todettiin toimivan luotettavasti, mutta ohjelmistossa oli luotettavuusongelmia. Järjestelmällä voidaan kuitenkin suorittaa mittauksia, mutta niiden laatu ja ohjelmisto helppokäyttöisyys ja kyky helpottaa työtä jäivät avoimiksi kysymyksiksi.

Järjestelmän jatkokehityksessä tärkein asia on luotettavuuden ja käytettävyyden parantaminen. Lisäksi automaattinen tehonsäätö mittauksen ohjausmoduuliin ja ominaiskäyrien säätämisen automatisointi ovat kehitettäviä asioita. Tuki dynaamisen MPPT-hyötysuhteen määrittämiselle on tärkein lisättävä ominaisuus tehonsäädön lisäksi.

## Lähteet

- 1 Wallin, Pekka. 1991. Sähkömittaustekniikan perusteet. Helsinki. Otatieto Oy.
- 2 Huusari, Juha. 2012. DC-DC Converters in Distributed Photovoltaic Electricity. System Analysis, Control and Design. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 3 Larbi, Salah, Bouhdjar, Amor, Chergui, Toufik. 2010. Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 14, Issue 1596, s. 470–477.
- 4 Nousiainen, Lari. 2012. Issues on Analysis and Design of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 5 IEC 61683:1999(E). Photovoltaic systems. 1999. Power conditioners. Procedure for measuring efficiency. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- 6 EN 50530:2010. Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters. 2010. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization.
- 7 EN 50530:2010/FprAA:2012. Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters. August 2012. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization.
- 8 TopCon Technical Datasheet. 2013. Verkkodokumentti. Regatron AG. <http://www.regatron.com/en/products-topcon/topcon-quadro-product-line/topcon-standard-types-and-technical-datasheets.html>. Luettu 16.1.2013.
- 9 Regatron DC Power Supply TopCon Series Model TC.P Manual for Controller Parameterization. Oktober 2010. Käyttöohje, Regatron AG.
- 10 Regatron TopCon series DC power, Manual for model TC.P Quadro. 2011. Verkkodokumentti. Regatron AG. <http://www.regatron.com/en/products-topcon/topcon-quadro-product-line/topcon-product-overview.html>. Päivitetty 11.11.2011. Luettu 20.8.2012.
- 11 Optional Function Generator TopCon TFE/Operating by Means of Operating and Service Software TopControl. 30. 8.2004. Käyttöohje. Regatron AG.
- 12 WT3000 Precision Power Analyzer User's Manual. Verkkodokumentti. Yokogawa Electric Corporation. [http://www.yokogawa.co.jp/ftp/dist/ks/eusers/wt/ked5s/im/IM760301-01E\\_062.pdf](http://www.yokogawa.co.jp/ftp/dist/ks/eusers/wt/ked5s/im/IM760301-01E_062.pdf). Päivitetty 2.4.2012. Luettu 20.8.2012..



## Liite 1. Säteilivoimakkuudet ja ajoitukset dynaamisen MPPT-hyötysuhteen mittauksessa

Taulukko 3. Pienet ja keskiuuret säteilivoimakkuudet [2, s. 18]

Toistoja	Kulmakerroin (W/m <sup>2</sup> /s)	Nostoaika (s)	Pitoaika (s)	Laskuaika (s)	Pitoaika (s)	Odotus sarjan loppuksi (s)
2	0,5	800	10	800	10	300
2	1	400	10	400	10	300
3	2	200	10	200	10	300
4	3	133	10	133	10	300
6	5	80	10	80	10	300
8	7	57	10	57	10	300
10	10	40	10	40	10	300
10	14	29	10	29	10	300
10	20	20	10	20	10	300
10	30	13	10	13	10	300
10	50	8	10	8	10	0

Taulukko 4. Keskiuuret ja suuret säteilivoimakkuudet [2, s. 19]

Toistoja	Kulmakerroin (W/m <sup>2</sup> /s)	Nostoaika (s)	Pitoaika (s)	Laskuaika (s)	Pitoaika (s)	Odotus sarjan loppuksi (s)
10	10	70	10	70	10	300
10	14	50	10	50	10	300
10	20	35	10	35	10	300
10	30	23	10	23	10	300
10	50	14	10	14	10	300
10	100	7	10	7	10	0

Taulukko 5. Käynnistys- ja alasajotesti [2, s. 19]

Toistoja	Kulmakerroin (W/m <sup>2</sup> /s)	Nostoaika (s)	Pitoaika (s)	Laskuaika (s)	Pitoaika (s)	Odotus sarjan loppuksi (s)
1	0,1	980	30	980	30	300