

Ari Kristola

Aurinkosähköpaneelikentän kuormitussäädin lämmityskäyttöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Opinnäytetyö

14.04.2015

Tekijä(t) Otsikko	Ari Kristola Aurinkosähköpaneelikentän kuormitussäädin lämmityskäyttöön
Sivumäärä Aika	24 sivua 14.04.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	lehtori Osmo Massinen TkT. Erkki Räsänen
<p>Opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin säätölaitteen prototyyppi aurinkosähköpaneelikentän liittämiseksi omakotitalon varaavaan lämmitysjärjestelmään siten, että aurinkosähköpaneelikentästä saadaan mahdollisimman suuri teho.</p> <p>Työn lähtökohtana oli säätölaitteen edellinen prototyyppi. Työn tarkoitus on suunnitella ja valmistaa parannettu prototyyppi, johon on lisätty ohjauksia, virran mittaus ja paikallisverkko tietojen lukemiseksi paikallisverkon välityksellä.</p> <p>Säätöaitetta ohjaamaan valittiin Raspberry Pi tietokonekortti, jonka monipuolisilla ohjelmointityökaluilla voi laitteen toimintoja helposti muuttaa kulloisienkin tarpeiden mukaan.</p> <p>Säätöaitteen toteutukseen sisältyy laitteen sähköinen ja mekaaninen suunnittelu, materiaalihankinnat, prototyypin valmistus, ohjelmointi, asennus edellisen version tilalle ja testaaminen.</p> <p>Säätöaitteen toiminta osoittautui edellistä versiota paremmaksi, sillä uusi laite kykeni säätämään kuormituksen tarkemmin maksimitehon tuottavaksi. Mittadatan lukeminen kotitietokoneen selaimella on myös koettu tärkeäksi ominaisuudeksi.</p>	
Avainsanat	aurinkosähkö, lämmitys

Author(s) Title	Ari Kristola PV-Power Controller for Heating Purposes
Number of Pages Date	24 pages 14 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electric Power Engineering
Instructor(s)	Senior Lecturer Osmo Massinen D.Sc. Erkki Räsänen
<p>A prototype of a device to connect PV-panel field to a boiler based private house heating system, so that field is always loaded with maximum power, was designed and built in this Bachelor's thesis.</p> <p>The basis for this design was an earlier prototype. The aim for this thesis was to design and manufacture an improved prototype by adding more control outputs, current measurement and to connect the device to the local area network.</p> <p>As a controlling device, Raspberry Pi card computer was selected. This has all the advanced programming tools of Linux computer that enable easy software changes.</p> <p>Manufacturing new prototype involved hardware design, material orders, prototype manufacturing, software design, replacing old prototype with new one and testing.</p> <p>Functionality of the new design proved to be more precise, because of the increased number of load resistor outputs. Reading device parameters over the internet proved to be an important feature.</p>	
Keywords	solar power, heating

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tavoite	1
2	Määrittely	2
2.1	Lähtötiedot	2
2.2	Laitteen määrittely	3
3	Laitesuunnittelu	3
3.1	Ohjausyksikkö	3
3.2	Kytkinlevy	4
3.3	Mittaukset	5
3.4	Muut liitynnät	6
3.5	Mekaaninen toteutus	6
3.6	Jännitelähteet	7
4	Ohjelma	8
4.1	Huomioita	8
4.2	Mittaus ja säätöohjelman toiminta	9
4.3	Ohjelman tarjoamat palvelut	12
4.4	Ohjelman testaaminen	13
5	Laitteen asentaminen ja testaus	15
5.1	Asennus	15
5.2	Testaaminen	15
5.3	Pohdintaa testaamisesta	17
5.4	Lämpeneminen	19
5.5	Hyötysuhde	21
6	Yhteenveto	22
	Lähteet	24

1 Johdanto

1.1 Tavoite

Aurinkosähköpaneelit ovat vuosikymmeniä olleet laajalti käytössä pienitehoisissa ja matalajännitteisissä sovelluksissa, joissa investointikustannukset eivät pienen tehontarpeen vuoksi ole kasvaneet kohtuuttomiksi, vaikka hinta on tehoon nähden korkea. Aurinkosähköpaneelien hinnan lasku on tehnyt niistä hyvän vaihtoehdon muiden energian talteenottotapojen rinnalle [1].

Yleisesti tarjolla oleva tapa aurinkoenergian hyödyntämiseksi on sähköyhtiöiden tarjoama paketti, jossa aurinkosähköpaneelin keräämä energia syötetään sähköverkkoon. Verkkoon syötetystä energiasta maksetaan lähes sähkön kuluttajahinta, mutta ostettaessa sähköstä joutuu maksamaan sähkön hinnan lisäksi siirtomaksun sekä veroa ja siksi verkkoon myytävästä sähköstä jää tuottajalle noin kolmannes hyödystä. [2.]

Langis Oy on sulautettua- ja anturitekniikkaa kehittävä yritys, jonka tavoite on kehittää Suomeen sopivaa aurinkosähkötekniikkaa.

Tässä työssä esitellään teknologia, jonka avulla voidaan liittää aurinkosähköpaneelikenttä omakotitalon lämmitysjärjestelmään, ilman kytkentää sähköverkkoon.

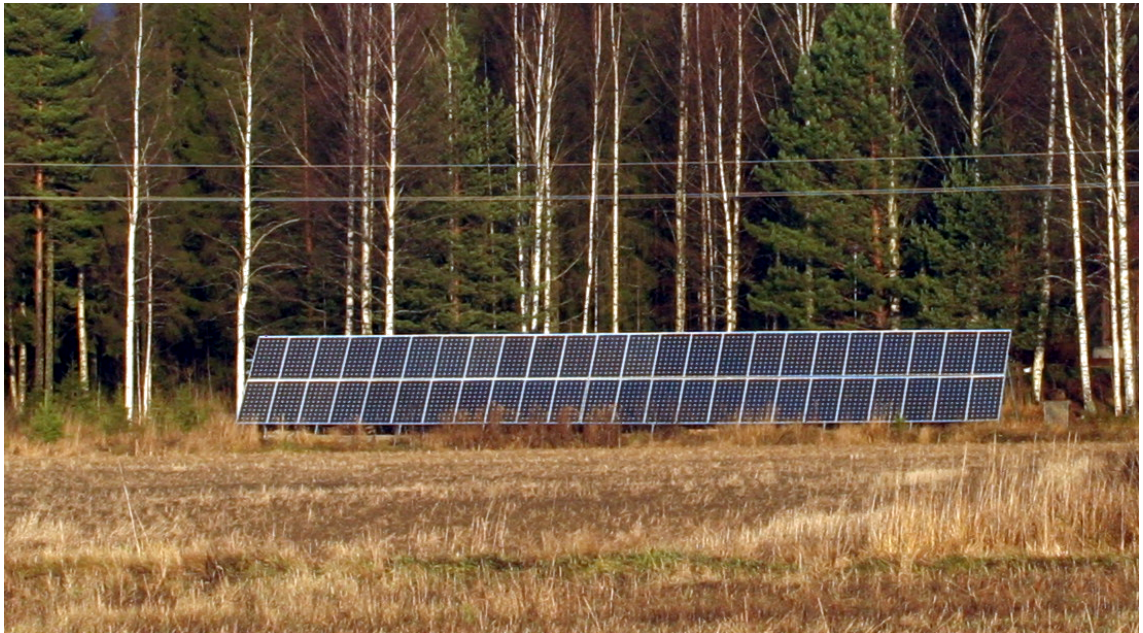
Työn tavoite on rakentaa laite, jolla kytkeä omakotitalon lämminvesivaraajan lämmitysvastukset aurinkosähköpaneelikentän kuormaksi siten, että kytkemällä eri kokoisia vastuksia rinnan eri kombinaatioilla kuormitetaan aurinkosähköpaneelistoa aina sen kulloistakin maksimitehoa vastaavalla kuormalla.

Kohteessa, johon laite suunnitellaan, on kolme kolmevaiheista lämmitysvastusta. Laitteen on vastuskombinaation valintaan tarvittavien sähköisten suureiden lisäksi mitattava lämminvesivaraajan lämpötilaa ja oltava seurattavissa paikallisverkon välityksellä.

2 Määrittely

2.1 Lähtötiedot

Aurinkosähköpaneelisto on ominaisteholtaan 12 kW. Aurinkosähköpaneelisto koostuu 48 kappaleesta ominaisteholtaan 250 W aurinkopaneelista. Yhden paneelin maksimitehon jännite on 30,9 V, ja virta tuolloin 8,1 A. Paneelisto koostuu kuudesta rinnan kytketystä kahdeksan paneelin sarjasta. Tällöin nimellisjännitteeksi tulee noin 240 V ja nimellisvirraksi noin 48 A.



Kuva 1. Työssä käytetty aurinkosähköpaneelisto.

Vesivaraajassa on kaksi 54 ohmin kolmivaihevastusta ja yksi 36 ohmin kolmivaihevastus. Niillä on mahdollista kuormittaa aurinkopaneelistora yli 10 kW:n teholla.

2.2 Laitteen määrittely

Laitteessa tulee olla yhdeksän kytkintä kuormien kytkemiseksi. Lisäksi tarvitaan vähintään yksi lämpötilamittaus ylläämpövalvontaan ja jännitteen sekä virran mittaus.

Laitetta ohjaava suoritin on voitava kytkeä paikallisverkkoon ja laitteiston toimintaa tulee voida seurata paikallisverkkoon liitetyn tietokoneen selaajalla.

Suorittimen tulee tukea yleisiä ohjelmointityökaluja, jotta sovellusohjelman tekeminen ei kuluta liikaa työn tekijän resursseja.

Suorittimen koon tulee olla mahdollisimman pieni ja olla helposti sijoitettavissa laitekaappiin. Suorittimen tulee toimia ympäristölämpötilassa, joka vastaa olosuhteita omakotitalon teknisessä tilassa.

3 Laitesuunnittelu

3.1 Ohjausyksikkö

Laitetta valittiin ohjaamaan Raspberry Pi B+ -tietokonekortti [3], johon voidaan suoraan liittää monitori, hiiri ja näppäimistö. Tietokonekortti voidaan kytkeä paikallisverkkoon ja käyttää sitä etänä. Tietokonekortissa on liitin, johon on johdettu useita prosessorin liityntöjä.

liittimeen on kytketty 1-WIRE-kommunikaatiokortti ja AD/DA-muunnin sekä lämmitysvastuksia virroittava Kytkinlevy.

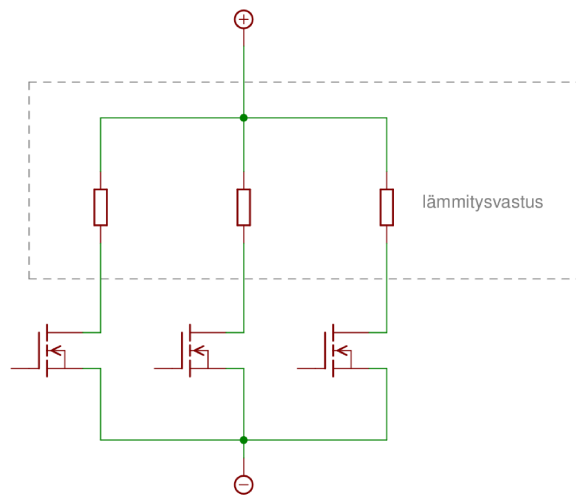
Raspberry Piissä toimivat kaikki Linux-tietokoneen ohjelmointityökalut. Kaikki tarvittu komponentit ja lisäkortit ovat hyllytavaraa ja helposti ostettavissa.

Myös muita vaihtoehtoja ohjausyksiköksi on tarjolla, mutta Raspberry Pi on lyhyessä ajassa saanut suuren määrän käyttäjiä ja Linux-käyttöjärjestelmänsä ansiosta sen vakaus ja ohjelmakoodin yhteensopivuus muiden järjestelmien kanssa oli niin suuri etu, että se karsi kaikki muut ehdokkaat pois vaihtoehtojen listalta.

3.2 Kytkinlevy

Kytkinlevyyyn rakennettiin 9 transistorikytkintä, jotta kytkentöjä olisi riittävästi kolmelle vastussarjalle. Käytetyt transistorit ovat kytkinkäytössä johtavassa tilassa resistanssiltaan 1,5 ohmia, ja siksi niitä on kytketty rinnan 9 kappaletta 50 ohmin vastuksia virroittamaan ja 11 kappaletta rinnan 35 ohmin vastuksia virroittamaan. Näin saadaan resistanssi laskemaan riittävän alas ja häviöt jakautumaan siten, ettei jäähdytyslevyjä tai pakotettua jäähdytystä tarvita teknisen tilan normaalia huonelämpöä korkeammissa lämpötiloissa. Transistoreiden hilaa ohjaa yksinkertainen transistoriaste, joka nostaa ohjauskortin liitännän 0–3,3 V:n ohjauksen 0–15 V:n tasolle. Kytkinlevyllä on LED-diodit osoittamassa ohjauksen aktiivisuutta.

Lämmitysvastukset on kytketty paneeliston positiiviseen napaan ja transistorit kytkevät virran vastuksen läpi (Kuva 2). Näin transistoreita ohjataan suhteessa paneeliston negatiiviseen napaan, mikä yksinkertaistaa merkittävästi kytkentää. Toinen mahdollisuus olisi ollut kytkeä vastus paneeliston negatiiviseen napaan ja kytkeä transistorilla vastus paneeliston positiiviseen napaan. Tällöin olisi pitänyt kuitenkin rakentaa jokaiselle kytkimelle erillinen ja galvaanisesti erotettu jännitelähde ja ohjaus. Rakenne olisi näin tullut merkittävästi monimutkaisemmaksi.

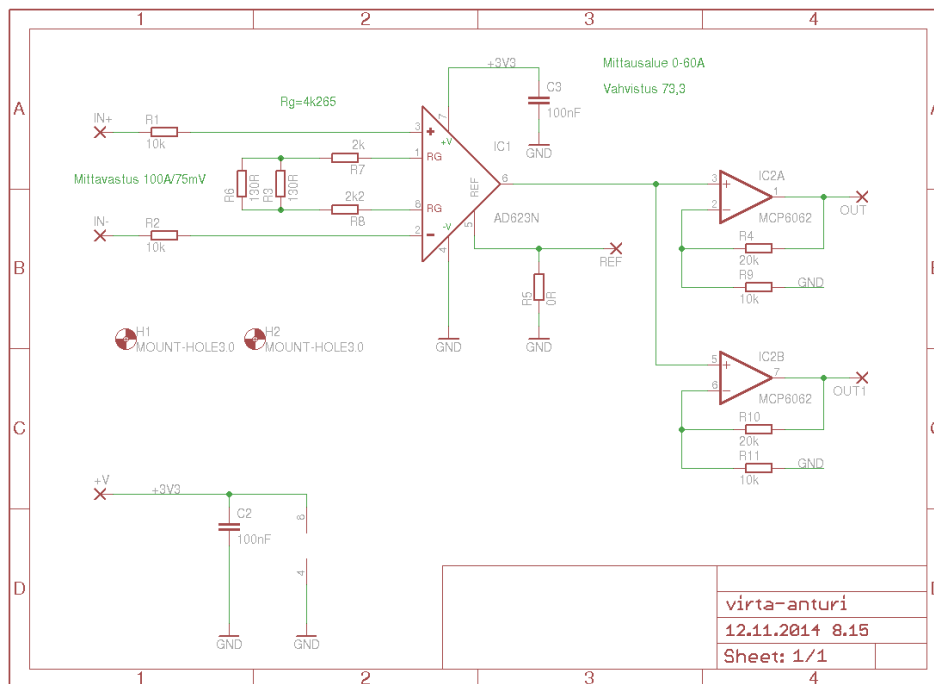


Kuva 2: Kytkentäperiaate.

3.3 Mittaukset

Jännite mitataan käyttämällä AD-muunninta. Koska AD-muuntimen ottoimbedanssi on hyvin suuri, ei vahvistinastetta nähty tarpeelliseksi. Ennen muunninta on vastusjako, jolla jännite lasketaan suhteessa 1/100:aan, jolloin AD-muuntimen 3,3 V:n maksimitulojännitteellä voidaan mitata nyt 330 V:n jännite.

Virran mittausta tehtiin käyttäen tarkoitukseen tehtyä pieniresistanssista vastusta, kilpiarvoiltaan 75 mV / 100 A. Virran vastuksen yli aiheuttamaa jännitettä vahvistetaan instrumentointivahvistimella AD623 [4], jonka yhteismuotoinen tulojännite ulottuu 150 mV alle nollan. Tällöin vahvistin ei kuitenkaan voi tuottaa 1,1 V suurempaa lähtöjännitettä, joten lisävahvistinaste (kuva 3/B4) vahvistuksella 3 vahvistaa edelleen instrumentointivahvistimen lähtöjännitettä.



Kuva 3: Kuvan kytkentä vahvistaa mittavastuksen jännitteen AD-muuntimelle sopivaksi.

Vahvistettu jännite muunnetaan digitaaliseksi AD-muuntimella. Vahvistimen kokonaisvahvistus on 73,3, jolloin mittausalue on 0-60A.

Lämpötilat anturoidaan MAXIM DS18B20 [5] 1-WIRE-lämpötila-antureilla, joita on tässä sovelluksessa kytketty yhteen kolminapaiseen johtimeen kaksi kappaletta. Lämpötilaa mitataan vesivaraajasta ja patteriverkon menovedestä.

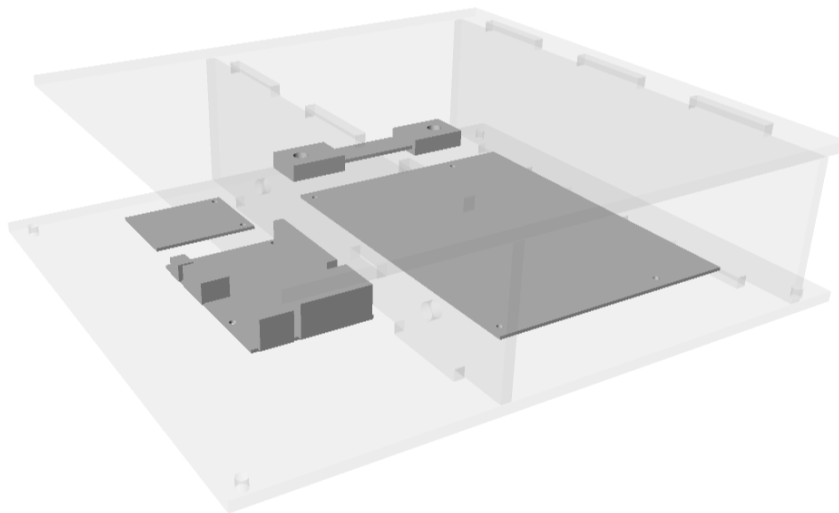
3.4 Muut liitynnät

Digitaali/analogia-muunninta (DA-muunnin) käytettiin analogisen mittarin motorointiin, antamaan selkeää informaatiota käyttäjälle. Laitekaapin oveen asennettu analogimittari osoittaa lämmitystehoa.

Internetin kautta käyttäjä voi selaimellaan seurata laitteen toimintaa ja tutkia historiadataa sekä lukea KWH-mittarin lukeman.

3.5 Mekaaninen toteutus

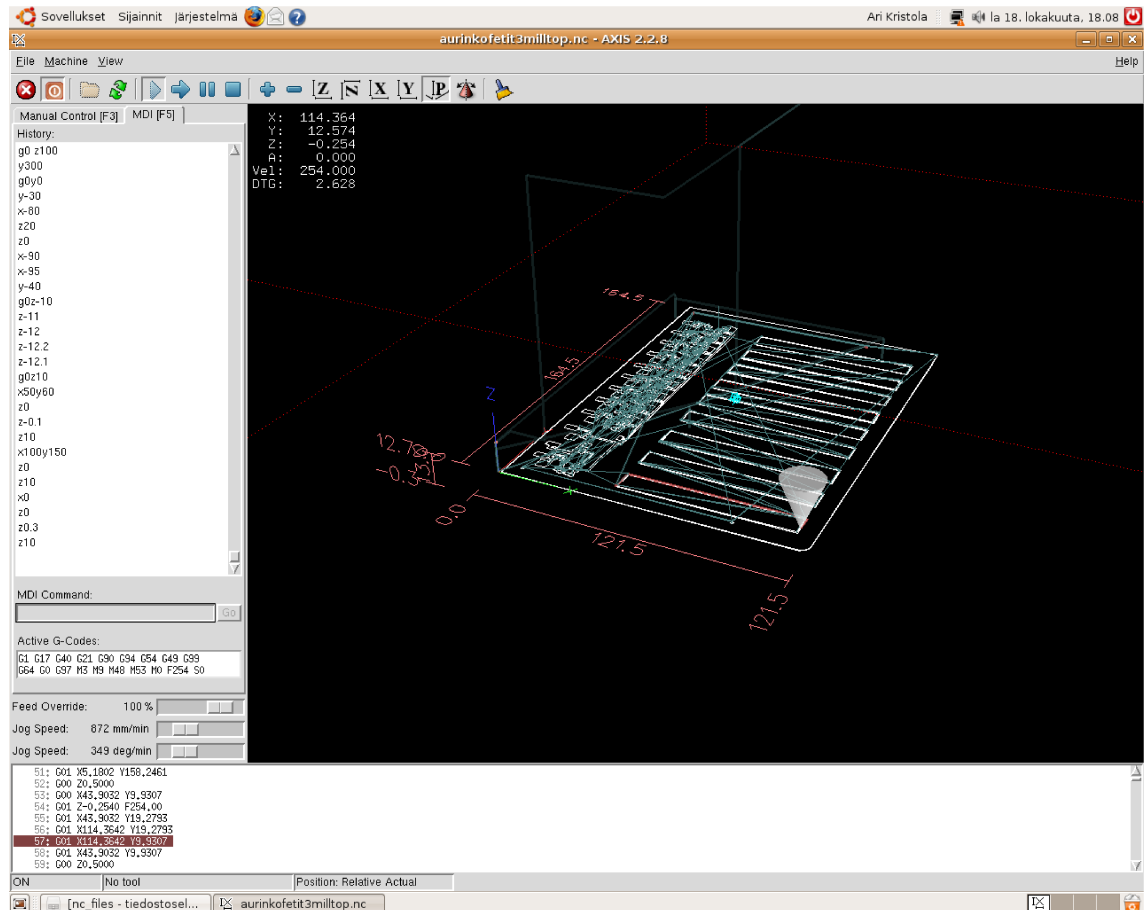
Laitteesta piirrettiin 3D-malli (Kuva 4), jota piirtäessä oli laitteen eri komponentit aseteltavissa sopivalle etäisyydelle ja sopivaan asentoon toisiinsa nähden. Erityistä huomiota kiinnitettiin laitteen käyttöönottoon, joka voi vaatia näppäimistön, hiiren ja monitorikaapelin liittämisen laitteeseen.



Kuva 4: Kuvassa laitteen mekaniikan mallinnus.

Laitteen mekaniikka tehtiin jyrsimällä kotelo kirkkaasta akryylimuovista, joka tarjoaa eri laitteen komponenteille hyvän kiinnityksen ja kosketussuojan jännitteellisille osille. Laite on statusledeineen koko ajan helposti havainnoitavissa läpinäkyvässä kotelossa.

Piirilevyt suunniteltiin Eagle-suunnitteluohjelmistolla, josta tuotettiin piirilevyjyrsimelle tarvittu ohjauskoodi Eagle-suunnitteluohjelmiston "pcb-gcode"-apuohjelmalla. Piirilevyt jyrsittiin piirilevyjyrsimellä (Kuva 5), jonka 0,4 mm:n jyrsinterä asetti rajoituksia käytetyille komponenteille.



Kuva 5: Säätimen kytkinlevyn valmistus jyrsimellä.

3.6 Jännitelähteet

Aikaisempi prototyyppi sai kaiken tarvitsemansa sähkön pistorasiaan liitettävästä 15VDC-jännitelähteestä, josta laskettiin lineaariregulaattorilla prosessoriyksikön tarvitsema 5VDC:n jännite. Uusi laite käyttää edelleen 15VDC-jännitelähdettä kytkinlevyn jännitelähteenä, jonka lisänä on pieni hakkurivirtalähde tuottamaan prosessorilevyn tarvitsema 5VDC.

4 Ohjelma

4.1 Huomioita

Raspberry Pi-tietokoneen Rasbian-käyttöjärjestelmässä on valmiiksi asennettuna työkalut Python¹-ohjelmointiin. Myös prosessorikortin lisäkorteille tarjoaa valmistaja kirjastot Pythonille. Siksi luonnollinen valinta ohjaus- ja tiedonkeruuohjelman kieleksi oli Python.

OWFS (One Wire File System) järjestelmä kerää lämpötila-antureiden datan.

Mittaustietojen muunto Json-muotoon [6] ja edelleenlähetys on tehty RUBY-ohjelmointikielellä [7].

Selaajalle HTML generoidaan HAML-kielellä [8], käyttäen CSS [9]-kirjastoa.

EYE-valvontaohjelma käynnistää toimintaan tarvittavat ohjelmat taustaprosesseiksi ja valvoo niiden toimintaa, käynnistäen ohjelmat tarvittaessa uudestaan ja raportoiden mahdollisista ongelmista sähköpostilla.

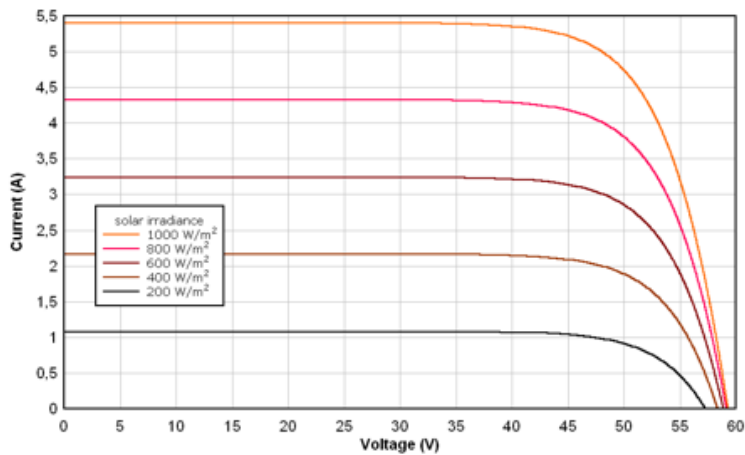
Ohjelma kokonaisuudessaan on talletettu GITHUB²-pilvipalveluun, josta sen voi tarvittaessa asentaa uuteen laitteeseen.

¹ Python on Basic-tyylinen ohjelmointikieli, jota ei käännetä. Nimensä kieli on saanut Monthy Pythonin mukaan.

² GITHUB palvelusta voi helposti tutkia eri ohjelmaversioiden väliset muutokset ja palveluun voi tallentaa uuden version koko ohjelmistosta kaikkine osineen yhdellä komennolla.

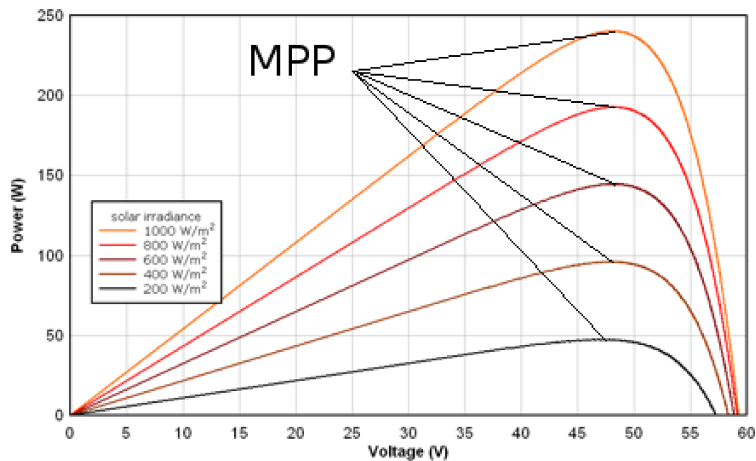
4.2 Mittaus ja säätöohjelman toiminta

Huomattavaa on, että aurinkopaneeli on luonteeltaan virtalähde. Kuormittamattoman aurinkopaneelin napajännite muuttuu vain vähän valaistusolosuhteiden muuttuessa, mutta sen virta on suoraan verrattavissa auringon säteilyn voimakkuuteen.



Kuva 6: Aurinkosähköpaneelin I/V kuvaaja [10].

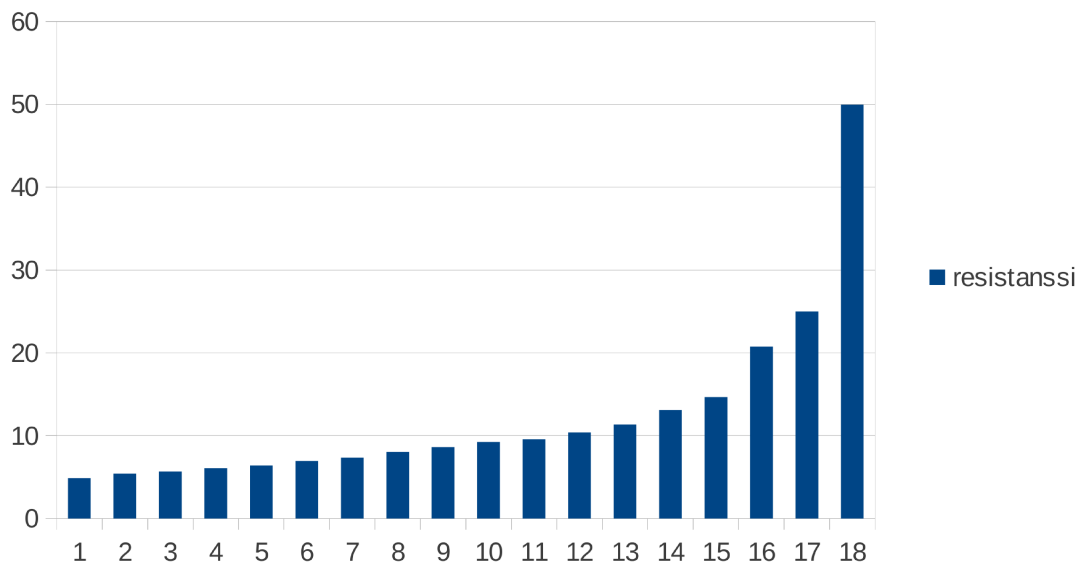
Tämä voidaan lukea kuvan 6 I/V kuvaajasta, josta nähdään aurinkosähköpaneelin jännite virran funktiona erilaisilla säteilyvoimakkuuksilla. Säätimen tarkoitus on pitää kuorma sellaisena, että kuormitus on aina maksimitehon kohdassa. Tämä kuormituspiste on luettavissa aurinkosähköpaneelin kuvan 7 P/V kuvaajasta.



Kuva 7: Aurinkosähköpaneelin P/V kuvaaja [10]. MPP (Maximum Power Point) on kuormitus, jolla aurinkosähköpaneelistä saa suurimman tehon.

Kun aurinkosähköpaneelin teho syötetään suoraan sähköverkkoon, on yleinen tekniikka maksimitehon saamiseksi mitata jatkuvasti aurinkosähköpaneelistä saatavaa maksimitehoa ja muuttaa kuormitusta jatkuvasti hieman suuremmaksi tai pienemmäksi [11]. Jos muutos johti suurempaan tehoon, kuormitetaan aurinkosähköpaneelia uudella paremman tehon tuoneella kuormalla, jota suurempaa ja pienempää kuormitusta taas kokeillaan.

Laitteeseen kytketyistä vastuksista on laskettu yhdistelmät, joilla aurinkopaneelikenttää voidaan kuormittaa siten, että säädössä tarvittavia eri kuorman resistansseja on mahdollisimman monta (kuva 8). Alle 15 ohmin kuormalla voidaan säätö tehdä hyvin tarkasti. Sitä suuremmilla resistansseilla vaihtoehdot ovat harvassa.



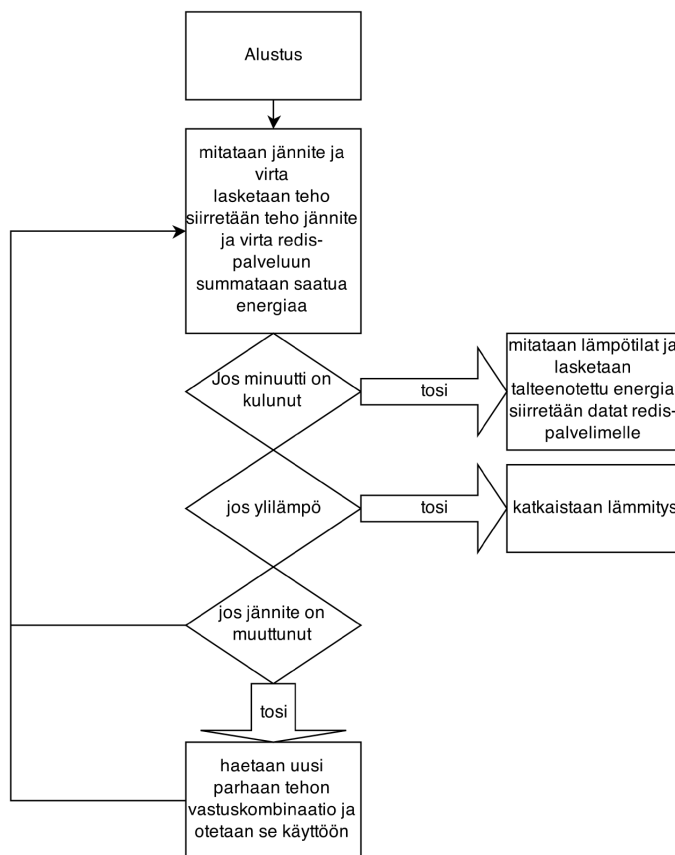
Kuva 8: Kuorman resistanssi laskettuna eri yhdistelmillä.

Laitteen säätöalgoritmin voi kuvata seuraavasti. Jos jännite muuttuu suuntaan tai toiseen yli asetetun rajan, käy laite kaikki 18 kuormituskombinaatiota läpi ja mittaa jokaisen kombinaation kohdalla vastusten jännitteen ja virran. Kombinaatioista valitaan se, joka on tuottanut vastuksiin suurimman tehon. Kombinaation valintaan johtanutta jännitettä ohjelma käyttää vertailuarvona jatkaessaan tulojännitteen vertailua. Ote ohjelmakoodista on tarkasteltavissa sivulla 12 Esimerkki 1:ssä.

Lämpötilat käydään lukemassa antureilta aina minuutin välein. Jos vesivaraajan lämpötila nousee yli 85 asteen lämpötilaan, kytketään kaikki lämmitysvastukset irti.

KWH-mittariin summataan lämmitysteho aina sekunnin välein. Jännite, virta, teho ja lämpötilat tarjotaan lähiverkossa olevien tietokoneiden selaajien esitettäväksi. Ohjelma on esitty vuokaaviomuodossa kuvassa 9.

Tiedot tehosta, jännitteestä, virrasta ja käytetystä vastuskombinaatiosta säilytetään 3 kuukautta tietokannassa, josta ne voidaan tarvittaessa lukea.



Kuva 9: Kuvassa pythonilla kirjoitettu säätöohjelma vuokaaviomuodossa.

Ohjelman alustuksessa annetaan vakioille ja muuttujille alkuarvot sekä kerrotaan kääntäjälle toimintaan tarvittavat kirjastot. Raspberry Pi:n liittimeltä suoraan käytettyjen liityntöjen toiminta, kuten ovatko ne syöttäviä vai vastaanottavia, kuvataan alustuksessa. Myös funktiot ja taulukot, joista AD-muuntimen luku on kirjoitettu funktioksi ja vastusvaihtoehdot taulukoksi, kuvataan ennen varsinaista pääohjelmaa.

```

if (pannuTemp > maxtemp): # jos pannu kuumana, katkaistaan lammitys
    maksimi = True
    vertailujannite = 0
    valinta = 0
    for pin in range(0, 8):
        xpin = RpiGPIO[pin]
        if Seq[valinta][pin]!=0:
            GPIO.output(xpin, True)
        else:
            GPIO.output(xpin, False)
    else: # tarkastetaan pitääkö vastuskombinaatiota vaihtaa
        if (vertailujannite > U + uraja) or (vertailujannite < U - uraja):
            StepCounter = 0
            vertailuteho = 0.0
            vertailujannite = 0.0
            while StepCounter < StepCount:
                for pin in range(0, 8):
                    xpin = RpiGPIO[pin]
                    if Seq[StepCounter][pin]!=0:
                        GPIO.output(xpin, True)
                    else:
                        GPIO.output(xpin, False)

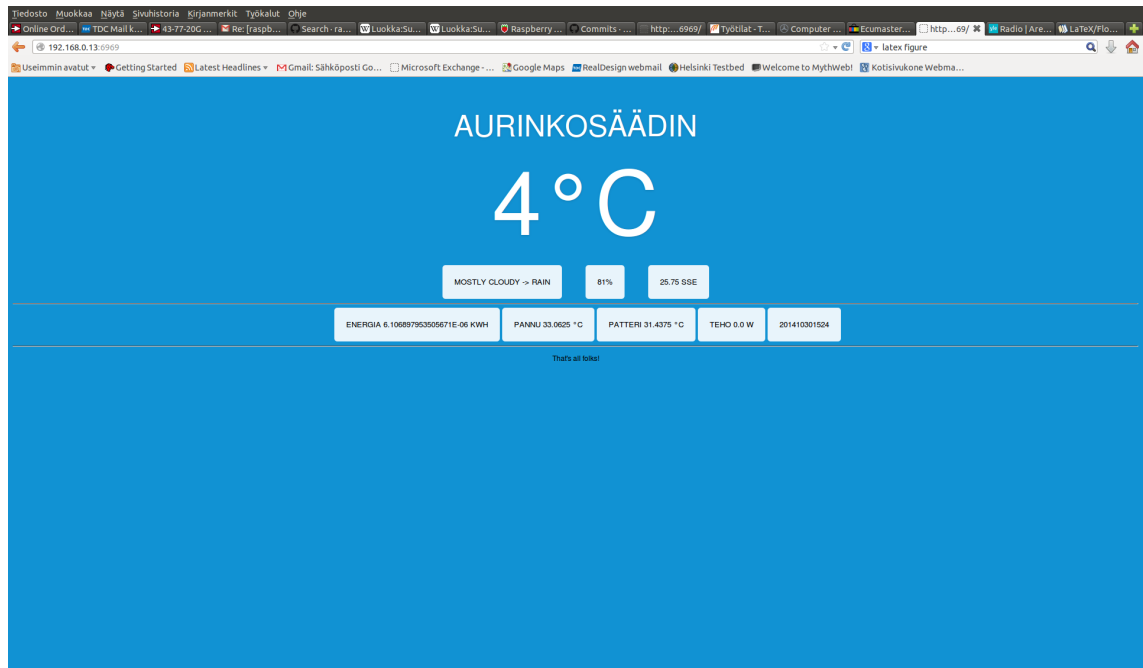
```

Esimerkkikoodi 1. Ote säätöohjelmasta, jossa tutkitaan yllämpö ja pitääkö uusi vastuskombinaatio etsiä.

Ohjelmasta rajatussa kohdassa verrataan vesivaraajan lämpötilaa asetettuun maksimilämpötilaan. Jos se ylittyy, katkaisee ohjelma lämmityksen. Jos maksimia ei ole ylitetty, vertaa ohjelma aurinkosähköpaneeliston viimeisintä mitattua jännitettä jännitteeseen, joka tallennettiin vertailuarvoksi edellisellä kerralla valittaessa optimikuormaa aurinkosähköpaneelistolle. Jos jännite on muuttunut yli muuttujan "uraja" verran, etsitään uusi parhaan tehon tuottava vastuskombinaatio.

4.3 Ohjelman tarjoamat palvelut

Ohjelma tarjoaa selaajalla luettavaksi (Kuva 10 sivulla 13) laitteen mittaamia ja mitatuista tiedoista edelleen laskettuja arvoja. Reaaliaikainen teho, KWH-mittari ja tieto vesivaraajan veden lämpötilasta niistä keskeisimpinä. Lisäantureilla on toteutettu myös ulkolämpötilan, autotallin lämpötilan sekä patteriverkon syöttö ja paluuveden lämpötilan mittaaminen.



Kuva 10. Säätimen rakentama nettisivu.

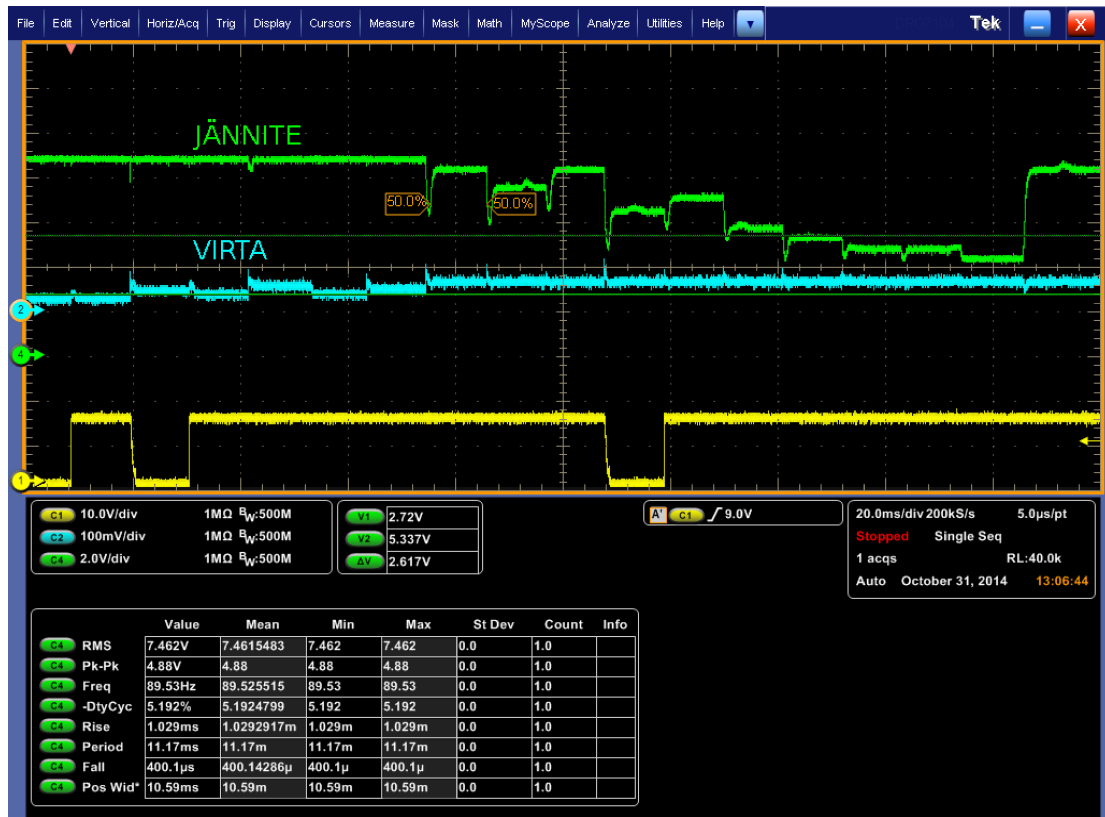
4.4 Ohjelman testaaminen

Toimintasekvenssin testaamiseksi laitteeseen kytkettiin tehovastukset ja laboratoriovirtalähde aurinkopaneelikenttää simuloimaan. Ohjelmaan asetettiin uuden vastuskombinaation etsimisen ehdoksi jännitteen muuttuminen yhden voltin verran suuntaan tai toiseen. Virtalähteen virtaa säätämällä valitsi laite aina uuden vastuskombinaation kuormittaakseen virtalähdettä mahdollisimman suurella teholla. Tämä oli havaittavissa siitä, että virtalähteeseen asetettu lähtöjännite nousi aina lähelle asetusrvoaan lähtövirran ollessa myös maksimiarvossaan tai lähellä sitä. Lisäämällä vastuskombinaatioita pääsee säätö lähemmäksi maksimikuormitusta. Nyt käytössä on kahta eri kokoista lämmitysvastusta, mutta kolmella eri koolla saisi kombinaatioita enemmän.

Testien ajaksi koodiin lisättiin rivejä syöttämään näytölle ohjelman toiminnasta kertovia parametreja. Näin voitiin varmistaa, että ohjelma suoritti aina halutut ohjelmanlohkot oikeissa tilanteissa.

Virran mittaamista ei voitu testata sen suurimmilla arvoilla puutteellisen laboratoriovarustuksen vuoksi. Testattu maksimivirta laboratoriossa oli 7,5 A.

Kuvassa 11 vihreä käyrä esittää virtalähteen jännitettä ja cyaani virtaa. Parhaan tehon tuottavaa kuormitusta etsiessä jännite alkaa lopulta laskea, virran noustua maksimiinsa.



Kuva 11. Säätimen testaamista ennen asennusta.

Vesivaraajan yllämpötilan aiheuttamaa lämmityksen katkaisua testattiin asettamalla vesivaraajan lämpötilaa mittaava anturi kuormavastusten yläpuolelle. Testin ajaksi lämpötilaraja asetettiin 50 asteeseen, jonka mitatessaan ohjelma katkaisi sähkön kaikilta lämmitysvastuksilta.

Jännitteen ja virran mittausta hienosäädettiin kertoimilla siten, että laitteen mitaamat arvot olivat prosentoin sisällä vertailumittareina olleiden Fluke 87 -jännitemittarin ja Fluke-325 -virtamittarin näyttämiä.

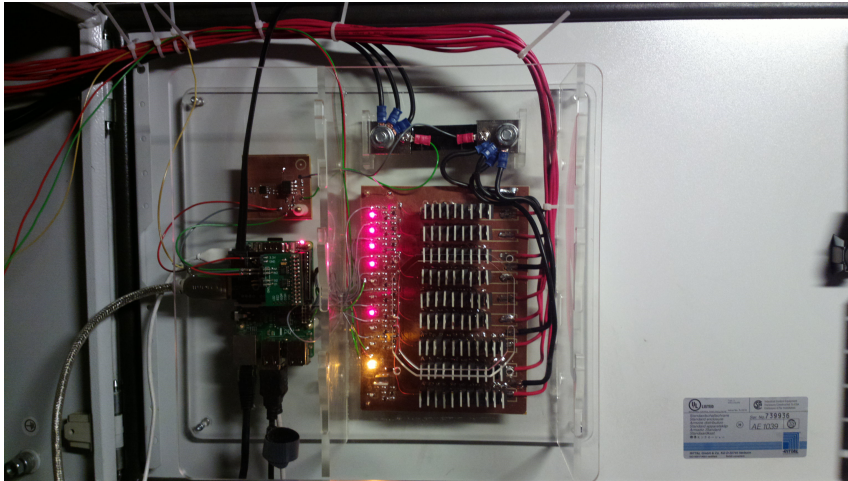
Tiedonsiirto paikallisverkkoon testattiin ja ohjelmaan lisättiin parametreja esitettäväksi selaimessa, ja kertomaan tietoja ohjelman toiminnasta.

5 Laitteen asentaminen ja testaus

5.1 Asennus

Laite asennettiin tekniseen tilaan, Rittalin laitekaapin (Kuva 12) oveen vesivaraajan läheisyyteen.

Muoviseen kosketussuojaan koneistettiin varmuuden vuoksi kiinnitysreijät puhaltimelle, jos osoittautuu, että pakotettu jäähdytys on joissakin olosuhteissa tarpeen.



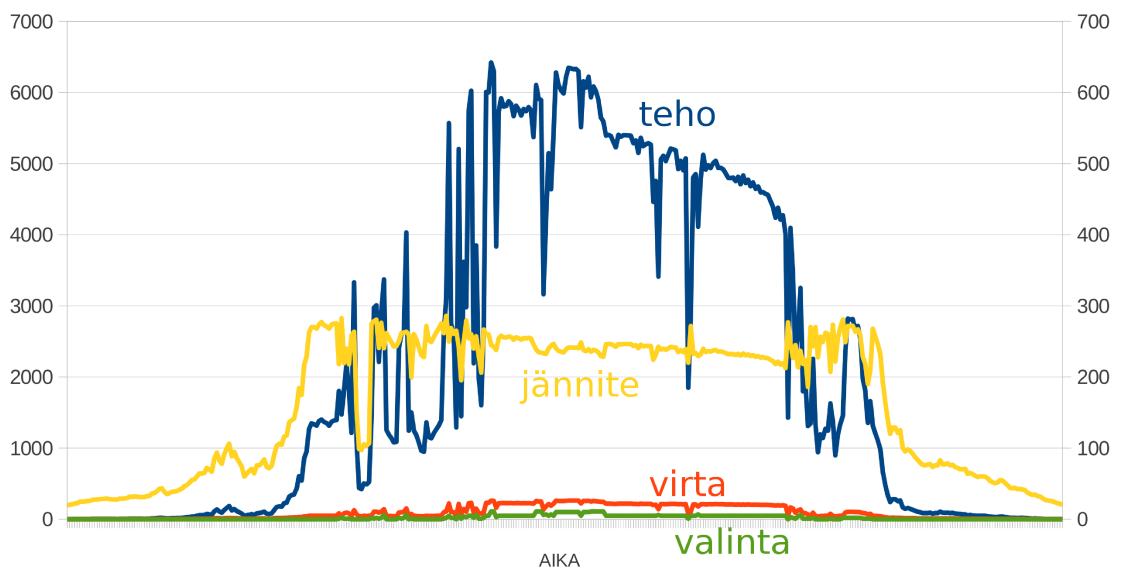
Kuva 12: valmis laite asennettuna laitekaapin oveen

5.2 Testaaminen

Vasta laitteen ollessa asennettuna oikeaan ympäristöön oli mahdollista tehdä ohjelman hienosäätöä. Mahdollisuus testaamiseen tuli sunnuntaina 16.11. auringon paistaessa sumun läpi muutaman tunnin. Testiohjelmalla saatettiin selvittää, kuinka nopeasti mittaussykli oli mahdollista tehdä mittaustulosten tarkkuuden ja toistettavuuden siitä kärsimättä. Alkuperäinen mittausnopeus oli 500 ms/askel, joka voitiin lopulta pudottaa arvoon 300 ms/askel. Näin saatiin koko mittaussyklin aika pudotettua 9 sekunnista 5,4 sekuntiin. Uuden kombinaation etsimisen jännitekynnystä päätettiin olla muuttamatta vielä testin tässä vaiheessa. Jo tällä muutoksella on kuormitus entistä tarkemmin

säädetty. Laitteen toiminnan havainnollistamiseksi ja testaamisen apuvälineeksi ohjelma muokattiin piirtämään graafit aurinkopaneelikentän jännitteestä, virrasta ja valitusta vastuskombinaatiosta. Käyristä pitää olla luettavissa, että jännite pysyy koko ajan maksimitehon alueella, jolloin säätö toimii.

Auringon säteilytehon noustessa rikkoutui yksi transistorikytkimestä sen jäädessä koko ajan johtavaan tilaan. Kytkimen kontakti lämmitysvastukselta irroitettiin ja testejä jatkettiin ilman kytkintä numero 8. Yhden vastuksen puuttuminen ei häirinnyt laitteen toimintaa merkittävästi, ja tarvittavat testit voitiin tehdä käyttäen hyväksi vuodenaikaan nähden harvinaista auringonpaistetta. Kuvan 13 käyristä nähdään aurinkosähköpaneelikentän jännitteen pysyvän maksimitehon jännitteessä tehon vaihdellessa.



Kuva 13: Mittausdataa lyhyestä aurinkoisesta hetkestä talvella.

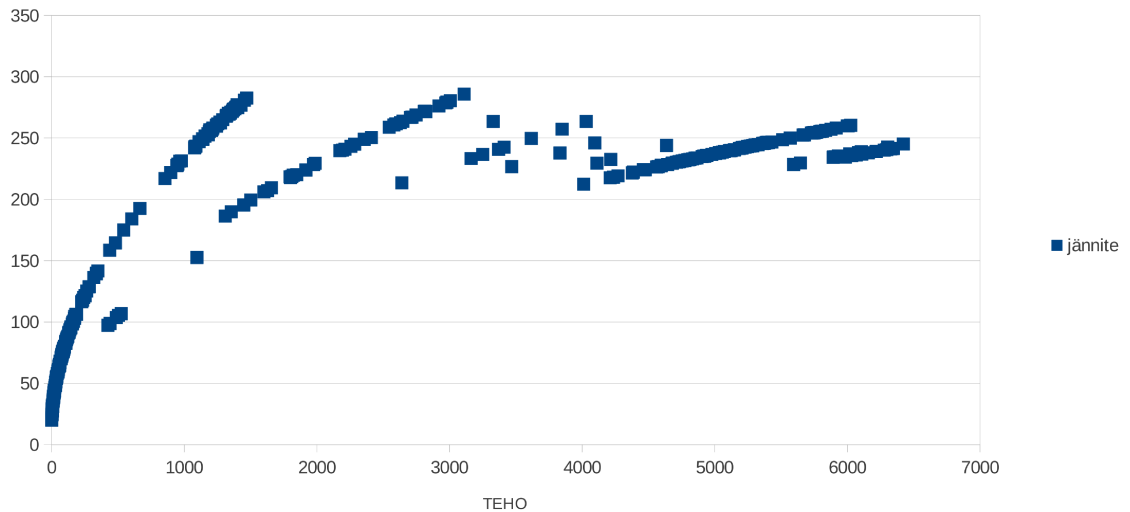
Käyrästä "valinta" käyrää seuraamalla voidaan lukea, mikä vastuskombinaatioista on kulloinkin käytössä. Aamun sarastaessa käytössä on vain yksi vastus, mutta jännitteen noustessa lisätään kuormavastusten määrää. Näin saadaan aurinkosähköpaneelikentän kuormitusta lisäämällä siitä maksimiteho.

Auringon valon hiipuessa kasvatetaan kuorman resistanssia, jotta laite kuormittaa aurinkosähköpaneelistoa sen maksimiteholla.

Huomattavaa on, että aurinkosähköpaneelin maksimitehon jännite muuttuu lämpötilan myötä siten, että jännite nousee lämpötilan laskiessa. Talvella maksimiteho voidaan

käytetystä paneelistosta saada 250 V:n jännitteellä, kun maksimitehon jännite kesähelteillä voi olla niinkin alhainen, kuin 200 V.

Mittadatasta saatiin generoitua myös käyrästä, josta voidaan tarkastella säädön tarkkuutta (Kuva 14). Kun esitetään jännite tehon funktiona säätimen valitessa aina kulloiseenkin tilanteeseen sopivan kuormituksen nähdään, kuinka säätö muuttuu tarkemmaksi tehon kasvaessa. Kuten kuvan 8 resistanssitaulukosta sivulla 10 voidaan lukea, on säätö pienillä tehoilla karkea.



Kuva 14: Kuvassa aurinkosähköpaneeliston jännite tehon funktiona säätimen valitessa kuormitusvastusten kombinaatiot.

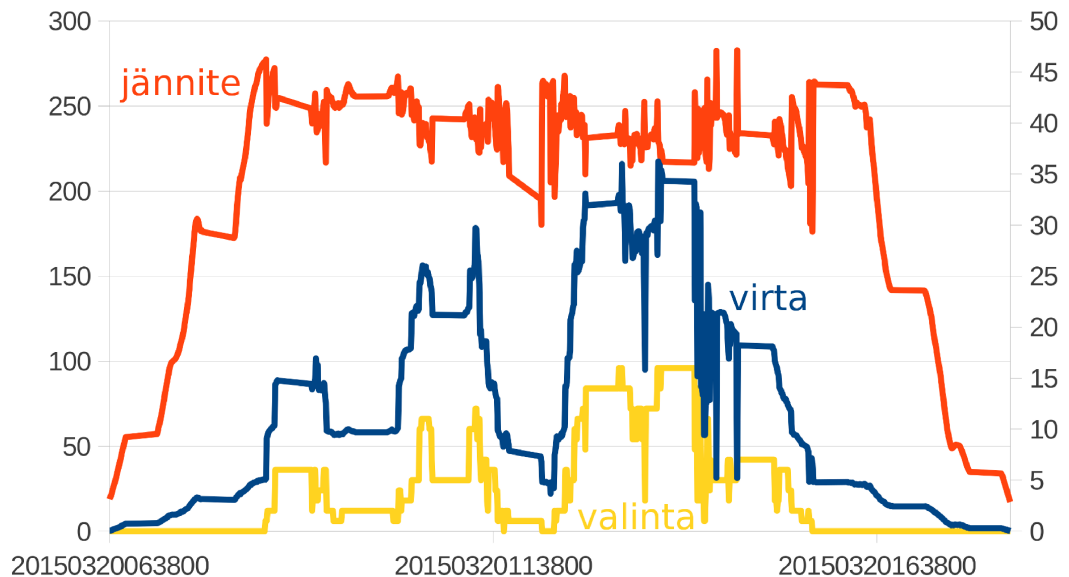
5.3 Pohdintaa testaamisesta

Suurien tehojen säätöä päästään kunnolla testaamaan todennäköisesti vasta ensi vuoden huhtikuussa, sillä aurinkopaneelijärjestelmän testaaminen talvella on sääolosuhteiden vuoksi hyvin hankalaa. Laitteisto kerää koko ajan mittadataa, jota voi myöhemmin analysoida. Tämä on hyvä ominaisuus, koska silloin laitteiston toimintaa voi arvioida ilman läsnäoloa ja jälkikäteen.

Säätöohjelma tallettaa jatkuvasti mittadataa ja säilyttää sitä kolme kuukautta. Mittadatasta voi luoda csv-tiedoston, jonka voi avata millä tahansa taulukkolaskentaohjelmalla tai käsitellä eteenpäin koneellisesti.

Testeissä rikkoutuneessa transistorikytkimessä oli rinnakkain kytkettynä 11 transistoria. Kaikki transistorikytkimen transistorit täytyy vaihtaa ennen kevättä ja samalla tutkia ohjausasteen korjaustarve.

Ulkopuolella varsinaisen työn tekoajasta, päivämäärällä 20.3.2015 saatettiin etelä-Suomessa tarkkailla osittaista, noin 82 %:n auringonpimennystä, joka tarjosi hyvän mahdollisuuden tarkkailla kuormitussäädön toimintaa. Pimennyspäivänä taivaalla oli päivän edetessä oheneva pilvikerros.



Kuva 15: Jännitteen, virran ja käytetyn vastuskombinaation mittaustiedot auringonpimennyksestä päivämäärällä 20.3.2015.

Kuvan 15 mittadatasta voidaan aurinkopaneeliston virrasta seurata auringosta maahan pääsevän säteilytehon muutosta pimennyksen edetessä. Vaikka virta putoaa murtoosaan, säilyy jännite kuitenkin maksimitehon alueella, kunnes virta laskee niin alas, että yksittäinen kuormitusvastus on liian suuri kuorma.

5.4 Lämpeneminen

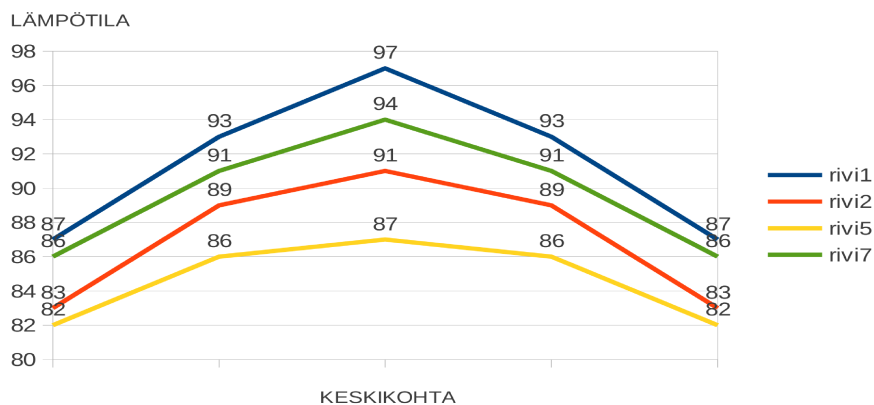
Aurinkosähköpaneelikentän maksimitehon nimellisjännite on 240 V. Taulukossa 1 on laskettu kytkimien häviötehot niiden virroittaessa lämmitysvastuksia. Yksittäisten transistorien lämpöhäviö on puolitoistakertainen 36 Ω :n lämmitysvastusta virroitettaessa, vaikka transistoreita on kaksi enemmän rinnakkain. Transistorien ahdas sijoittelu ja lämpötilan nousun aiheuttama kytkentäresistanssin nousu huomioon ottaen voi transistorien lämpötilan nousun arvioida olevan noin 40–50 °C ympäristön lämpötilaan verrattuna. Laboratoriotestissä yksittäisen transistorin lämpötila nousi 27 °C, kun sen läpi virtasi 600 mA:n virta. Tilanne vastaa 36 Ω vastuksen kytkentätilaa.

Taulukko 1: Laitteen häviötehot ryhmittäin ja transistoreittain.

PV jännite (V)	Ron (Ohm)	kpl rinnan	kokonaisR	vastuksen R	I (A)	TRhäviöt (W)	häviö/TR (W)
240	1,5	9	0,166667	54	4,430769	3,271959	0,364
240	1,5	11	0,136364	36	6,641509	6,014967	0,547

Maksimihäviöteho kytkimillä= 37,676655 W

Mittaukset osoittavat valmiin laitteen kytkintransistoririvin keskimmäisten transistorien lämpötilan nousevan 30 °C:n ympäristölämpötilassa lähes 100 °C:n lämpötilaan laitekaapin ollessa auki. Transistorien asettelu ja ala- sekä yläosastaan auki oleva kotelointi parantaa luonnollisen konvektion syntymistä, mikä tehokkaasti jäädyttää transistoreita, mutta ylimmät transistoririvit joutuvat konvektion vuoksi toimimaan korkeammassa ympäristölämpötilassa (Kuva 16).



Kuva 16: Transistoririvien lämpeneminen on suurin kytkinlevyn yläosassa.

Laitteeseen päätettiin lisätä pakotettu jäähdytys puhaltimella (Kuva 17) liiallisen lämpöstressin välttämiseksi. Mahdolliseksi käytettäväksi puhaltimeksi valittiin jo kotelo suunniteltaessa EBMPAPST 8556 N 12 W:n tehoinen puhallin, jonka valmistaja takaa toimivan vielä 90 asteen ympäristölämpötilassa. Laitteen suurin mahdollinen häviöteho jäähdytyspuhaltimen teho mukaan luettuna on 55 W, ja laitekaapin sisälämpötilan on mitattu nousevan 8 °C ympäristöönsä verrattuna 55 W teholla lämmitettäessä. Laitekaapin ovi suljettuna pysyy transistorien lämpötila puhaltimen avulla alle 70 °C, joka on vielä transistorin datalehdessä [12: figure 2] tulkittavissa turvallisesti toimintalämpötilaksi.



Kuva 17: Pakotettu jäähdytys lisättiin laskemaan kytkinlevyn lämpötilaa.

5.5 Hyötysuhde

Laitteen kytkimien häviöteho on 38 W (Taulukko 2) lämmitystehon ollessa maksimissaan. Laitteen muun tehontarpeen ollessa 17 W, tulee hyötysuhteeksi täydellä teholla 99,5 %. Aurinkosähköpaneeliston tehon laskiessa laskee myös virroitettavien vastusten lukumäärä ja näin myös transistorien lämpöhäviöt. Kahden vastuksen lämmittäessä vesivaraajaa on hyötysuhde laskenut arvoon 98,9 %.

Taulukko 2: hyötysuhde täydellä ja osateholla

	Pin (W)	P häviö (W)	P ohjaus (W)	hyötysuhde
täysteho	11162,194	38	17	99,5072653
osateho	2126,7691	6,54	17	98,8931568

Hyötysuhde on korkea vain auringon paistaessa. Talviaikaan ja yöllä on kaikki laitteen käyttämä energia hukkaenergiaa, etenkin jos lämpötilamittauksia pannuhuoneelta ei pidä käytetyn energian arvoisena.

Yöaikaan ja pilvisellä talvisäällä voi energiankulutusta pienentää sammuttamalla jäähdhdytyspuhaltimen. Koska laitteen muu energiankulutus on 5 W, 12 W:n puhallin kolminkertaistaa laitteen energiankulutuksen. Puhaltimen ohjaus voidaan lisätä ohjelmakoodiin esimerkiksi, käynnistämällä puhallin aina kun vastuksille syötetty teho ylittää tehon, jonka ohjaamiseen tarvitaan enemmän kuin yksi kytkinyksikkö.

6 Yhteenveto

Testausajan osuessa talveen ei laitetta voitu testata täydellä teholla, ja auringonpaisteen ollessa talvella harvinaista tarkoitti testaaminen laitteen tallentamien tietojen tutkimista aurinkoisen hetken jälkeen. Testaaminen saatiin kuitenkin tämän työn kuluessa alkuun.

Toteutuneelle laitteelle mitattiin korkea hyötysuhde, johon suurimmaksi osaksi vaikuttaa tasasähkön syöttäminen sellaisenaan lämmitysvastuksille. Tasasähkön jännitteen ja virran mittaaminen on verrattain helppoa ja nopeaa verrattuna 50 Hz:n vaihtosähkön mittaamiseen. Sähkön muuttaminen vaihtosähköksi heikentää hyötysuhdetta ja lisääi laitteiston monimutkaisuutta.

Aurinkosähköpaneelien keräämän energian syöttäminen suoraan lämminvesivaraajan vastuksiin ja näin ollen koko järjestelmän pysyminen erotettuna sähköyhtiön verkosta on paras vaihtoehto niin kauan kuin kaikki kerätty energia voidaan käyttää lämmitykseen.

Työssä syntynyt laite on prototyyppi, joka on tehty kehitettäessä integroitua säädintä omakotitalokäyttöön. Jos laite nykyisellään olisi tarkoitus jättää pysyvästi käyttöön, olisi siihen syytä kehittää säätimen tehonsyöttö riippumattomaksi verkkosähköstä. Sen voi toteuttaa esimerkiksi hakkuritehonlähteellä, suoraan paneelientän sähköllä. Akkuvarmennuksella voi varmistaa järjestelmän toiminnan öisin ja sähköverkon vikatilanteissa. Liittämällä laitteistoon akusto ja invertteri saattaisi se toimia varavirtalähteenä.

Laitteen kytkinlevy on mahdollista tehdä edullisemmin käyttäen releitä. Releiden tasasähkön katkaisukyky on matala, mutta jännite releen yli voidaan kytkentä ja katkaisutilanteissa laskea releen kanssa rinnan olevalla transistorilla. Näin vältetään käyttämästä tarpeettoman kalliita kytkinkomponentteja.

Myös ohjauksen laitteistokustannuksia saadaan laskettua toteuttamalla se mikrokontrolleria käyttäen. Tällöin ohjelmiston tekeminen vaatii kuitenkin paljon suuremman työmäärän.

Aurinkosähkön merkitys auringon säteilyenergian hyödyntämisessä tulee varmasti kasvamaan Suomessa hintojen laskiessa ja kokemusten karttuessa.

Suomi on aurinkoenergian hyödyntämisessä hyvässä asemassa harvaan asuttuna maana, johon ei suurienkaan paneelistojen rakentamisessa ole esteitä. Haja-asutusalueilla tontit ovat suuria, ja peltojen rajaamat alueet ovat esteettömiä ja siksi erinomaisia aurinkosähköpaneelistojen rakennuspaikkoja.

Aurinkosähkön syöttäminen sähköverkkoon on nykyään teknisesti helposti toteutettavissa. Sähköyhtiöltä saatava korvaus energiasta on likimain sama kuin sen ostohinta. Takaisin ostettaessa joutuu sähkön hinnan lisäksi maksamaan kuitenkin myös sen siirtomaksun ja veron. Verkkoon syöttämiseen tarvittavat laitteistot nostaa järjestelmän hintaa, ja kasvattaa takaisinmaksuaikaa.

Edellisten seikkojen vuoksi puolustaa opinnäytetyönä syntynyt järjestelmä omaa paikkaansa, verkkoon syöttävien järjestelmien rinnalla.

Pitkä talvi on tuottamaton, sillä lokakuun puolesta välistä maaliskuun alkuun mennessä energiaa paneelistöön kertyy pahimmillaan vain muutaman kesäpäivän tuotannon verran. Tämä on juuri sitä aikaa, kun omakotiasuja tarvitsee eniten energiaa.

Puolet vuodesta on kuitenkin mahdollista saada kaikki tarvittava energia auringosta, ja se kannattaa hyödyntää.

Lähteet

- 1 Aurinkoenergia. MOTIVA verkkodokumentti.
<http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia>. 3.9.2014. Luettu 17.11.2014.
- 2 Santala Sanna. Oma energiantuotanto ja sen kytkeminen kiinteistöjen sähköverkkoihin. verkkodokumentti.
<<https://publications.theseus.fi/handle/10024/6713/browse?value=Santala%2C+Sanna&type=author>>. Toukokuu 2011 . Luettu 17.11.2014.
- 3 Prosessorikortti. Raspberry Pi Model B+. verkkodokumentti.
<<http://www.raspberrypi.org/products/model-b-plus/>>. Luettu 17.11.2014.
- 4 AD623 datalehti. Analog Devices. verkkodokumentti.
<<http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad623/products/product.html>>. Rev. D. Luettu 17.11.2014.
- 5 1Wire lämpötila-anturin datalehti. Maxim integrated.
<<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. REV: 042208 . Luettu 17.11.2014.
- 6 JavaScript Object Notation. Wikipedia JSON. verkkodokumentti.
<<http://en.wikipedia.org/wiki/JSON>>. 13.11.2014. Luettu 17.11.2014.
- 7 RUBY ohjelmointikieli. Ruby community. verkkodokumentti.
<<https://www.ruby-lang.org/en/>>. Luettu 17.11.2014.
- 8 HAML kuvauskieli. HTML abstraction markup language. verkkodokumentti.
<<http://HAML.info>>. Luettu 17.11.2014.
- 9 CSS tyylilehdet. Cascading Style Sheets. verkkodokumentti.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Cascading_Style_Sheets>. 13.9.2014. Luettu 17.11.2014.
- 10 Aurinkosähköpaneelin sähköiset kuvaajat.
<<http://www.pvresources.com/BalanceofSystem/Modules.aspx>>. 6.11.2014. Luettu 17.11.2014.
- 11 Maximum power point tracking. Perturb and observe. verkkodokumentti.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking>. 6.11.2014. Luettu 17.11.2014.
- 12 Kytkinlevyn tehotransistori. BUZ41a datalehti. verkkodokumentti.
<http://www.ic37.com/HARRIS/BUZ41A_datasheet_5648673/>. Elokuu 1988. Luettu 17.11.2014.