



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Oskari Sirola

Aurinkosähköjärjestelmän toiminta ja aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

7.11.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Oskari Sirola Aurinkosähköjärjestelmän toiminta ja aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittaust 35 sivua + 1 liite 7.11.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Ammatillinen pääaine	Elektroniikka
Ohjaajat	Lehtori Esko Tattari
<p>Insinööritöiden aihe oli aurinkosähköjärjestelmän toiminnan selvittäminen ja aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittaust. Aiheen valitsin itse ja hyväksytin sen ohjaavalla opettajallani.</p> <p>Töiden tavoite oli tutkia mistä komponenteista aurinkosähköjärjestelmä koostuu ja miten aurinkopaneeli muuntaa auringon säteilyenergian sähköiseksi energiaksi. Työssä mitattiin myös verkkokaupasta ostetun aurinkopaneelin ominaiskäyrä.</p> <p>Tiedot aurinkosähköjärjestelmän komponenteista selvitettiin kirjallisuuden ja internetin avulla. Aurinkopaneeli ostettiin verkkokaupasta ja ominaiskäyrän mittaukset tehtiin Espoossa elokuussa 2018.</p> <p>Tulokseksi työstä saatiin selvitys aurinkosähköjärjestelmän komponenteista ja toiminnasta. Verkkokaupasta ostetun aurinkopaneelin jännitteet ja virrat mitattiin ja tulokseksi saatiin aurinkopaneelin ominaiskäyrä. Mitatut virranarvot eivät täysin täyttäneet aurinkopaneelin ilmoitettuja arvoja.</p> <p>Insinööritöitä voi käyttää kuka tahansa, joka haluaa selvityksen aurinkosähköjärjestelmän ja sen komponenttien toiminnasta.</p>	
Avainsanat	aurinkosähkö, aurinkopaneeli, pii

Author Title Number of Pages Date	Oskari Sirola Working Principals of a Solar Power System and Measurement of Solar Panel's Characteristic Diagram 35 pages + 1 appendix 7 November 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Professional Major	Electronics
Instructors	Esko Tattari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this study is to clarify how silicon based solar panels and solar panel systems work. All the necessary components of a solar panel system are explained, as well as the journey of light from the Sun to the Earth.</p> <p>The study included electric voltage and current measurements with a solar panel. The characteristic diagram of the solar panel was crafted according to the results. The measurements were conducted in Espoo in August 2018 on a cloudy day and on a sunny day.</p> <p>The information regarding the solar panel system was gathered from literature and the internet. The solar panel that was the subject of the measurements was bought from an internet-based store.</p> <p>The result of the study is a combination of theory and practical information on the use of a solar panel. The solar panel that was the subject of the measurements did not fulfill its reported current values.</p> <p>The study gives the reader an understanding of solar panel systems and how the different components of it work.</p>	
Keywords	solar power, solar panel, silicon

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Valo	1
2.1	Valon lähde	1
2.2	Valon synty	2
2.3	Valon luonne ja liike	4
2.4	Valosähköinen ilmiö	6
3	Pii	7
3.1	Atomi	7
3.2	Puolijohde	9
4	Aurinkosähköjärjestelmä	10
5	Aurinkokenno	11
5.1	Aurinkokennon toimintaperiaate	11
5.2	Aurinkokennojen perussuureet	13
5.3	Aurinkokennomateriaalit	14
6	Lataussäädin	16
7	Invertteri	17
8	Akku	19
8.1	Akku varastointimuotona	19
8.2	Lyijyakut	20
8.3	Litium-ioniakut	22
9	Aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittaus	24
9.1	Mittauksen tarkoitus	24
9.2	Mittausvälineet ja kytkentä	26
9.3	Mittaukset	31
9.4	Tulokset	33

10	Yhteenveto	35
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Ominaiskäyrän mittaustulokset	

1 Johdanto

Aurinkosähkö ja piipohjaiset aurinkopaneelit ovat kiinnostaneet minua pitkään. Idea siitä, että pystymme passiivisesti muuttamaan auringon säteilyenergiaa sähköenergiaksi, on mielestäni ihmeellistä.

Myös auringon tuottaman valon syntyprosessi ja matka maapallolle ovat asioita, joita on mietitty kautta historian. Halusin itse perehtyä aurinkoenergiaan, koska uskon sen olevan tulevaisuudessa yksi suurimmista, ellei suurin energiantuotantomuoto.

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää itselleni sekä kaikille lukijoille, kuinka valo syntyy auringossa ja kuinka se otetaan aurinkopaneelien avulla talteen akkuihin. Ostan työtä varten kuluttajille suunnatun aurinkopaneelin ja mittaan sen ominaiskäyrän, josta saan tietooni aurinkokennon tehontuoton.

Valmiin työn tarkoitus on antaa kenelle tahansa lukijalle hieman syvempi katsaus siihen, kuinka valo syntyy ja kuinka aurinkoenergia otetaan talteen piipohjaisilla aurinkopaneeleilla.

2 Valo

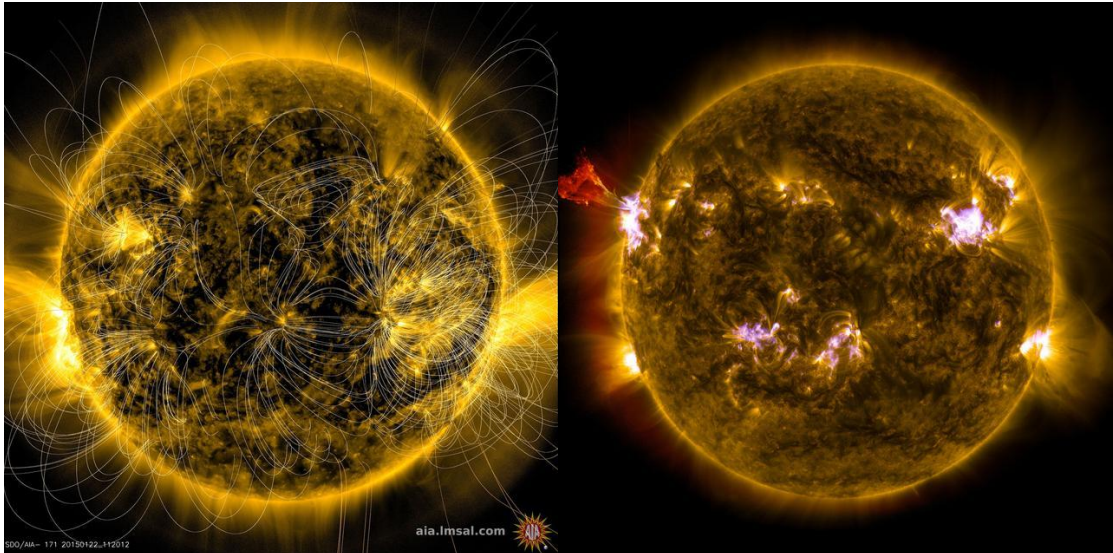
2.1 Valon lähde

Suurin valonlähteemme ja samalla meidän elämänlähde on lähin tähtemme, Aurinko. Se on noin 150 miljoonan kilometrin päässä meistä ja sen massa vastaa n. 99,8 % koko aurinkokuntamme massasta. Auringon valolla eli fotoneilla, voi kestää jopa 170 000 vuotta päätyä auringon ytimestä sen pinnalle, josta ne aloittavat noin kahdeksan minuutin matkansa maapallolle. [1, s.1–2; 2.]

Aurinko on valtava plasmapallo, joka säteilee ympärilleen valoa ja hiukkasia, sisässään tapahtuvan ydinprosessin avulla [1, s.4].

Auringon massa koostuu suurimmaksi osaksi vedystä (noin 70 %) ja heliumista (noin 27 %) ja se on 109 kertaa kookkaampi kuin Maa [2; 3].

Kuvassa 1 on kaksi kuvaa auringosta.



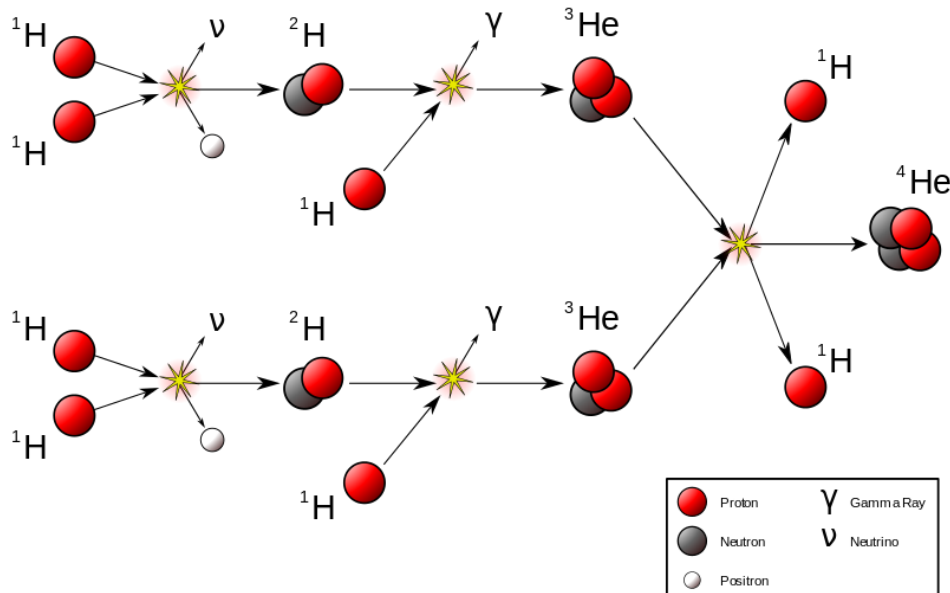
Kuva 1. Vasemmalla kuva auringosta ja sen magneettikentistä. Oikealla kuvassa keskikokoisia auringonpurkauksia [4].

Auringosta saapuva säteilyteho maapallon pintaan on noin $1 \text{ kW} / \text{m}^2$. Säteilyteho maapallon ilmakehän ulkopuolella on keskiarvolta noin $1,368 \text{ kW} / \text{m}^2$, mutta ilmakehän läpäistessä teho tippuu hieman. [5, s.13.]

2.2 Valon synty

Aurinkopaneelien talteen ottama energia on peräisin auringossa tapahtuvasta ydinfuusiosta. Auringon ydinfuusiassa vetyatomit yhdistyvät kovan paineen ja lämmön alaisina helium atomeiksi, ja samalla reaktiossa vapautuu sähkömagneettista säteilyä. Tästä säteilystä noin 50 % on infrapuna-alueella, 40 % näkyvän valon alueella ja 10 % ultraviolettialueella. [1, s. 34; 6, s. 1.]

Vedyn fuusio heliumiksi on nimetty protoni-protoni-ketjuksi. Nimitys tulee ketjureaktiosta, jossa vedyn yksittäiset protonit yhdistyvät. Tässä ketjussa on kolme vaihetta, joita havainnollistaa kuva 2.



Kuva 2. Protoni-protoni-ketju [7].

Ensimmäisessä vaiheessa vetyatomit ovat niin kovan lämmön ja paineen alla, että ne menettävät ainoan kiertävän elektroninsa. Tämän jälkeen ne siirtyvät niin lähelle toisiinsa, että reaktio tapahtuu. Reaktiossa kahdesta vetyatomien ytimeistä, eli kahdesta protonista, toinen muuttuu neutroniksi. Samalla syntyy myös antiaine- hiukkanen nimeltään positroni sekä yksi neutriino. Positroni elää hyvin lyhyen elämän ja löytää vastahiukkasensa, elektronin, jolloin molemmat tuhoutuvat ja vapauttavat ympärilleen gammasäteilyä. Syntynyt neutroni ottaa nopeasti parikseen protonin ja syntyy hiukkanen nimeltä deuteroni. [1, s.34–36.]

Reaktion toisessa vaiheessa syntynyt deuteroni yhtyy protoniin (vedyn ydin), joka muodostaa vajaan heliumytimen, jossa on kaksi protonia, mutta vain yksi neutroni kahden sijasta eli helium-3 ydin. Reaktiossa vapautuu taas gammasäteilyä. [1, s.34–36.]

Reaktion kolmannessa eli viimeisessä vaiheessa kaksi helium-3 ydintä kohtaa. Tämän kohtauksen seurauksena syntyy täydellinen helium-4 ydin ja samalla ylimääräiset kaksi protonia kaikkooa. [1, s.34–36.]

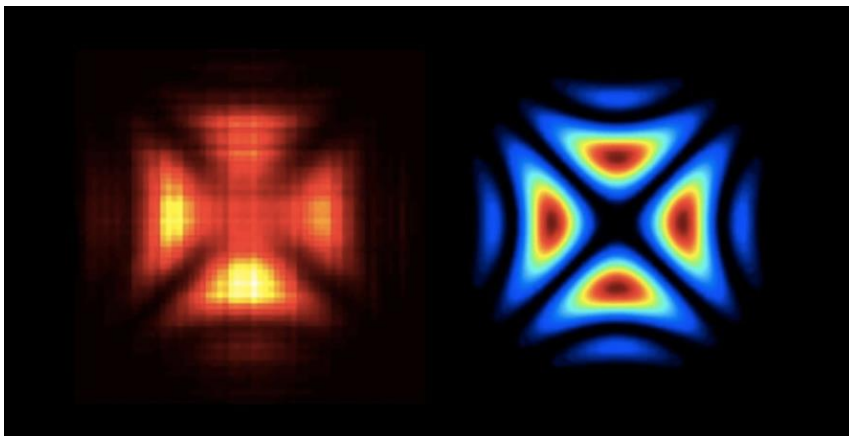
Täydellisen helium-4 ytimen syntyäkseen, käy vety vaiheet 1 ja 2 läpi kaksi kertaa. Syn-
tyneessä helium-4 ytimessä on vain 0,7 kertaa reaktioon vaadittavien aineiden massa,
joten puuttuva energia purkautuu ulos säteilynä, sekä fotoneina. Reaktiossa vapautuva
sähkömagneettinen säteily aloittaa matkansa auringon ytimestä maata kohti. [1, s.34–
36.]

2.3 Valon luonne ja liike

Valon luonne on dualistinen, eli valolla on sekä aalto- että hiukkasluonne. Valo on säh-
kömagneettista aaltoliikettä samalla kun se koostuu alkeishiukkasista, fotoneista. [8,
s.328, 476–477.]

Fotoni on kaiken valon perusyksikkö. Se on aina liikkeessä ja liikkuu valon nopeudella c ,
eli noin $2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Koska fotonit ovat olemassa ainoastaan liikkuvina hiukkasina, ei
niillä ole massaa, sähkövarausta tai lepoenergiaa. Niillä on kuitenkin energiaa liikkeessä,
ja tämä energia riippuu fotonin värähtelytaajuudesta. Kun värähtelytaajuus on juuri so-
piva, pystyy fotoni siirtämään energiansa törmätessään elektroniin. Tämä energiansiirto
on aurinkopaneelien toiminnan salaisuus. [9.]

Tiedemiehet saivat kokeellisesti rakennettua fotonin kuvan Puolassa Varsovan yliopis-
tossa vuonna 2016. Fotonin hologrammi on kuvitettu kuvassa 3. [9.]

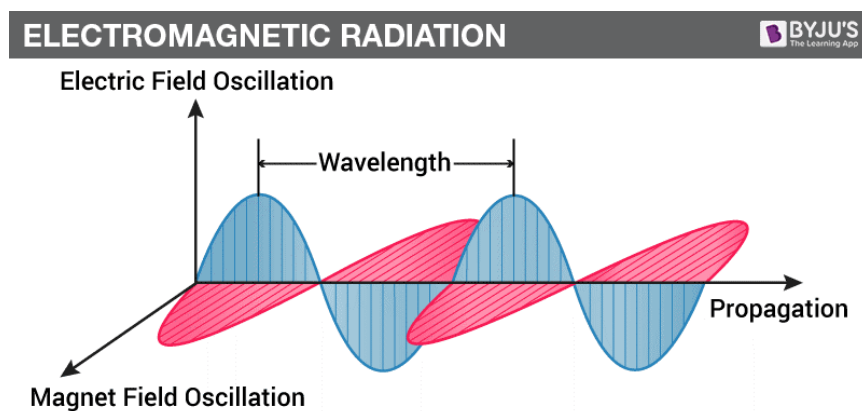


Kuva 3. Kuvan vasen fotoni on rakennettu mittaustulosten perusteella. Oikealla on teoreettisesti päätelty fotonin muoto [9].

Tämä on ensimmäinen kerta, kun fotoni on saatu rakennettua kokeellisten menetelmien avulla.

Valo on siis fotoneita, sekä sähkömagneettista aaltoa. Michael Faraday ja James Clerk Maxwell osoittivat 1800-luvulla, että valo on poikittaista aaltoliikettä. Muuttuva sähkökenttä aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka aiheuttaa muuttuvan sähkökentän jne. Nämä muodostavat yhdessä sähkömagneettisen aallon, joka etenee tyhjiössä valon nopeudella. [8, s.27.]

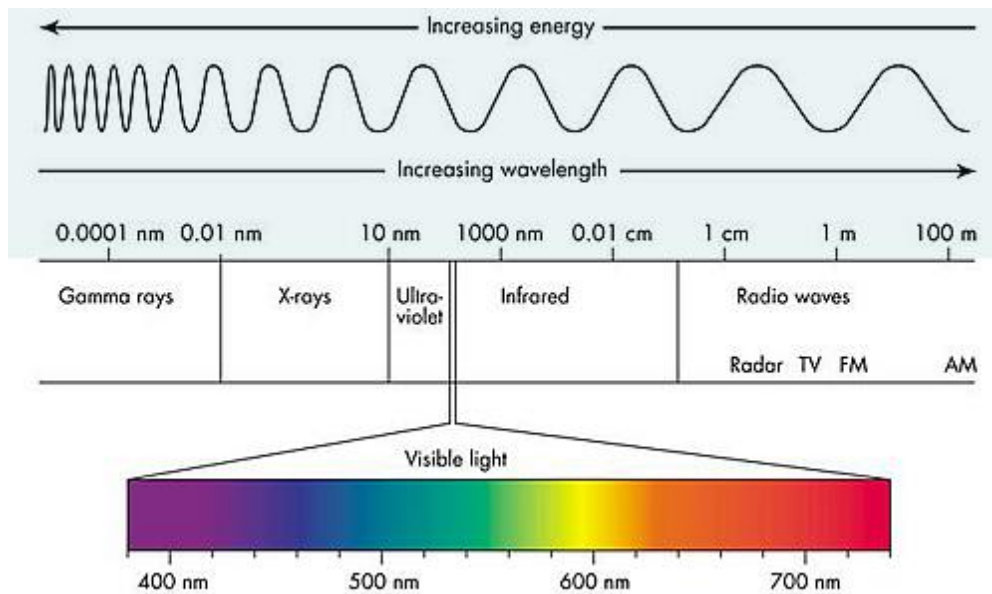
Kuvassa 4 on esitettyä sähkömagneettinen aalto.



Kuva 4. Sähkömagneettinen aalto [10].

Sähkömagneettinen aalto on siniaaltoa, jonka sähkökenttä on aina pystysuunnassa ja magneettikenttä poikkisuunnassa [8, s.336–337].

Tätä aaltoliikettä on koko sähkömagneettisten aaltojen spektri radioaalloista gammasäteilyyn [8, s.329]. Näin ollen voimme ajatella kaikki kuvassa 5 olevat eritaajuiset säteilyt "valona".



Kuva 5. Sähkömagneettinen spektri [11].

Kuvassa huomataan, että näkyvä valo on vain murto-osa sähkömagneettisesta spektristä. Silti tällä ohuella näkyvän valon taajuusalueella on kyky saada aurinkopaneelit tuottamaan sähköä.

2.4 Valosähköinen ilmiö

Valosähköisessä ilmiössä valo aiheuttaa elektronien emittoitumisen eli irtoamisen metallilevystä. Irronneita elektroneja kutsutaan fotoelektroneiksi. [8, s.456.]

Valo koostuu kvanteista eli fotoneista, joiden energia on $h \cdot f$. Yhtälössä h on Planckin vakio, noin $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ (elektronivoltti \cdot sekunti) ja f on fotonin värähtelyn taajuus hertseissä. Kun kvantti osuu metalliin, absorboituu energiaa metallissa olevaan valensielektroniin. Osa tästä kvantin energiasta kuluu elektronin irrottamiseen metallista. Jokaisella metallilla on ominainen energiamäärä, joka tarvitaan elektronin irrottamiseen. Tätä energiamäärää kutsutaan metallin työfunktiksi p . Jäljelle jäänyt energia muuttuu elektronin kineettiseksi energiaksi K . Valosähköistä ilmiötä kuvaava kaava on

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = hf - p,$$

jossa m on elektronin massa ja v sen nopeus. [12, s.1.]

Auringosta saapuvat fotonit luovuttavat Einsteinin pelkistetyssä mallissa kaiken energiansa metallin yksittäiselle elektronille. Fotoni häviää ja elektroni irtoaa metallin pinnasta välittömästi. [8, s.457.]

Aurinkokennojen toiminta perustuu auringon säteilyyn, valosähköiseen ilmiöön ja puolijohdemateriaalien ominaisuuksiin [13, s.9].

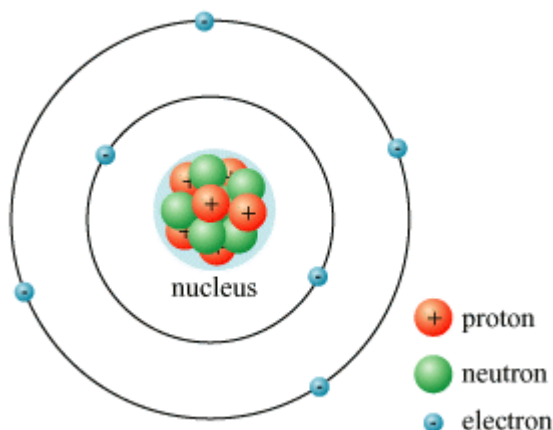
3 Pii

3.1 Atomi

Kaikki aineet koostuvat atomeista. Atomin ytimessä on protoneita ja neutroneita ja ydintä kiertävät elektronit. Protoneilla on positiivinen varaus ja elektroneilla samansuuruinen, mutta negatiivinen varaus. Neutronit ovat varauksettomia. [14, s.29.]

Alkuaineet määritellään järjestyslukunsa mukaan, mikä tarkoittaa atomin ytimessä olevien protonien lukumäärää. Piiin järjestysluku on 14, eli ytimessä on 14 protonia. Kuparin järjestysluku on 29 ja vedyn 1. [15, s.12, 15, 43, 77.]

Kuvassa 6 on selventävä kuva atomista.



Kuva 6. Atomin ydin koostuu protoneista ja neutroneista, joita kiertävät elektronit [16].

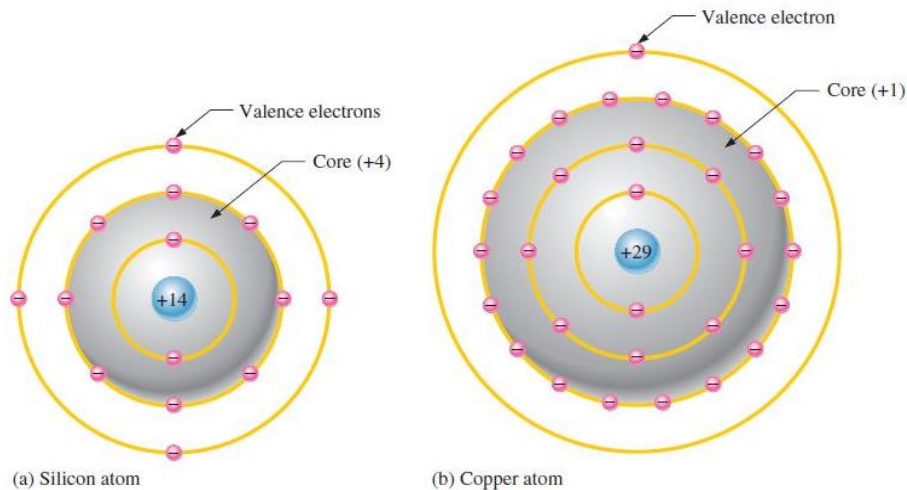
Atomin ydintä kiertävät siis elektronit. Elektroni on alkeishiukkanen, jolla on alkeisvarauksen suuruinen sähkövaraus. Alkeisvaraus on noin $1,60 \cdot 10^{-19}$ C. Sähkövarauksen tunnus on Q ja yksikkö SI-järjestelmässä coulombi (C). Coulombi määritellään sähkövirran yksikön ampeerin (A) avulla. Inkisen ym. [8, s.12] mukaan määritelmä on seuraava:

”Kun johtimessa kulkeva sähkövirta on yksi ampeeri, niin sekunnissa johtimen poikkileikkauksen läpi siirtyy yhden coulombin suuruinen sähkövaraus, joten $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$.”

Protonin ja elektronin massojen ero on valtava. Protonille on laskettu massaksi n. $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Elektronin massa on n. $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg [7, s.507]. Suhdelukuna protoni on massaltaan noin 1830 kertaa painavampi kuin elektroni. Neutroni painaa lähes saman verran kuin protoni [16]. Kiinteiden aineiden sähkönjohtavuuden ymmärtämisessä auttaa vyöteoria ja energiavyön käsite [8, s.563].

Atomin energiatilat muodostavat melkein jatkuvia jakaumia, energiavöitä. Jokaisella vyöllä voi olla vain tietty määrä energiaa. Monien vierekkäisten atomien energiavyöt voivat mennä osittain päällekkäin, mutta niiden väliin jää tyhjiä alueita, joissa ei ole sallittuja energiatiloja. Tällaisen alueen nimi on kielletty vyö, koska sitä vastaavaa energiaa elektronilla ei voi olla. Ulointa täyden energian sisältämää vyötä kutsutaan valenssi-vyöksi. Ulointa vajaata energiavyötä kutsutaan johtavuusvyöksi. [8, s.563–564.]

Kuvassa 7 on piiatomi ja kupariatomi sekä niitä ympäröivät elektronit.



Kuva 7. Vasemmalla on kuva piiatomista ja oikealla kupariatomista [18].

Piiatomin uloimmalla energiavyöllä on neljä valenssielektronia, joita se käyttää sidosten muodostamiseen. Piiatomit jakavat jokaisen neljästä elektronistaan toisten piiatomien kanssa. Näin ollen jokainen atomi saa täyden kahdeksan elektronia käsittävän valenssivyön. [8, s.565.]

Elektroni voi liikkua jo tavallisissa lämpötiloissa lämpöliikkeen energian turvin valenssivyöstä kapean kielletyn energiavyön yli johtavuusvyöhön. Johtavuusvyössä elektroni voi liikkua vapaasti ja kuljettaa negatiivisen alkeisvarauksen suuruisen sähkömäärän. Elektronin irrotessa valenssivyöstä se jättää jälkeensä yhden elektronin vajauksen eli aukon. Naapuriatomista saattaa siirtyä elektroni aukkoon, jolloin tämä aukko siirtyy naapuri-sidokseen. Tällä tavoin aukko voi liikkua valenssivyössä ja kuljettaa positiivisen alkeisvarauksen suuruisen sähkömäärän. [8, s.565–566.]

3.2 Puolijohde

Kiinteät aineet on kategorisoitu kolmeen ryhmään sähkönjohtavuutensa mukaan. Nämä ryhmät ovat johteet, puolijohteet ja eristeet. Pii kuuluu näistä ryhmistä puolijohteisiin. [8, s.565.]

Johteissa johtavuusvyö eli ylin elektronien miehittämä vyö on vain osittain täynnä. Kaikki elektronit eivät voi kuitenkaan sijaita johtavuusvyön pienintä energiaa vastaavassa tilassa. Lämpötilassa $T = 0 \text{ K}$ elektronit miehittävät käytettävissä olevat tilat ns. Fermi energiaan asti, joka on tyypillisesti 3–8 eV johtavuusvyön alarajaa vastaavan energian yläpuolella. Fermi energian yläpuolella johtavuusvyössä on paljon vapaita energiatiloja, minne elektronit voivat siirtyä pienenkin lämpövarähtelyn tuoman lisäenergian avulla. Tämän takia metallien sähkön- ja lämmönjohtavuudet ovat hyvät. [8, s.564.]

Eristeissä ylin energiavyö on ns. ”täynnä” elektroneja. Tämän täyden valenssivyön ja johtavuusvyön välissä on suuri kielletty energiavyö, joka on noin 5–8 eV. Koska valenssivyössä tai sen läheisyydessä ei ole vapaita energiatiloja, ei lämpöliike tai ulkoinen sähkökenttä pysty kiihdyttämään elektroneja vyövälän yli. Täten sähkövirta ei kulje eristeissä. [8, s.564–565.]

Puolijohteet ovat vyörakenteeltaan samanlaisia kuin eristeet. Erona on selvästi pienempi kielletyn energiavyön energia, joka on piillä n. 1,1 eV. Puolijohde on lämpötilassa $T = 0 \text{ K}$ eriste, mutta lämmön ja termisen energian kasvaessa valenssivyön ylärajassa olevat elektronit saavat riittävästi energiaa ja voivat siirtyä johtavuusvyölle. Johtavuusvyössä ne liikkuvat ulkoisen sähkökentän määräämään suuntaan. [8, s.565.]

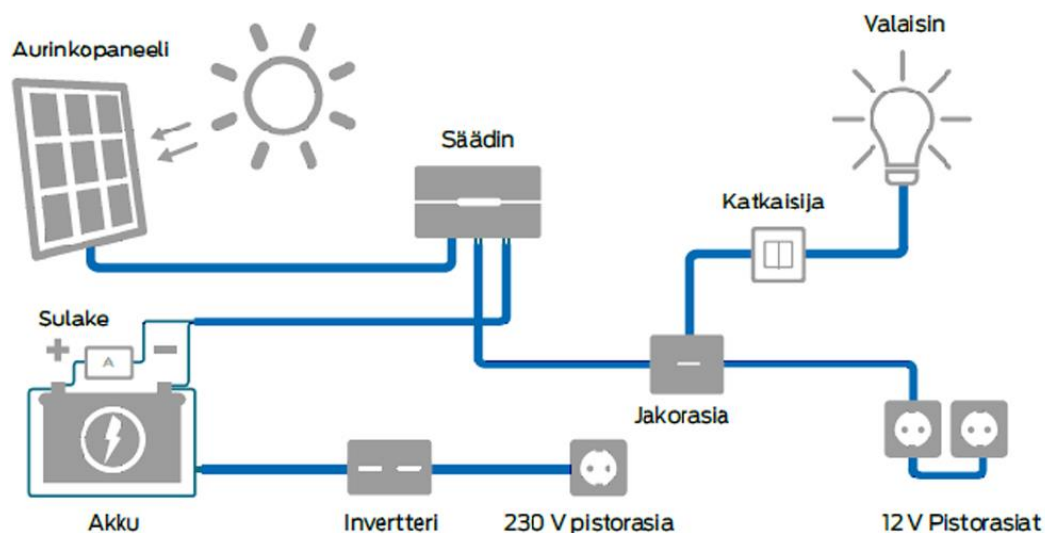
4 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu pienimmillään vain muutamasta komponentista, joita ovat aurinkopaneeli, lataussäädin, invertteri ja akusto [19, s.62].

Jos järjestelmä on yleiseen sähköverkkoon kytkettävä, kytketään se suoraan talon sähköverkkoon verkkoinvertterin kautta. Tällöin järjestelmässä ei yleensä ole akustoa. [20.]

Pienemmät aurinkosähköjärjestelmät, esim. mökeille asennettavat, sisältävät akuston, ja järjestelmän käyttöjännite on normaalisti 12 tai 24 voltia. Jos halutaan käyttää 230 voltin laitteita, voidaan järjestelmään lisätä invertteri. [20.]

Kuva 8 esittää yksinkertaisen 12 voltin aurinkosähköjärjestelmän.



Kuva 8. 12 voltin aurinkosähköjärjestelmä [21].

Aurinkopaneeli ottaa vastaan auringon säteilyä ja johtaa tuotetun sähkön lataussäätimelle. Lataussäädin huolehtii akun turvallisesta latauksesta ja varmistaa, ettei akku purkaannu liian tyhjäksi. Lataussäätimen perässä on 12 / 24 voltin pistorasiat sekä valaistus. Akun perässä on yleensä invertteri, jos halutaan käyttää 230 voltin laitteita. [19, s.43, 62.]

5 Aurinkokenno

5.1 Aurinkokennon toimintaperiaate

Nykyisten aurinkokennojen toiminta perustuu piin kykyyn reagoida auringon säteilyyn [14, s.35].

Pii on puolijohde, mikä tarkoittaa, että se pystyy oikeissa olosuhteissa johtamaan sähköä. Aurinkokennot ovat yleensä valmistettu kahdesta piin seoksesta. Aurinkoon suunnattu puoli on seostettu ohuesti fosforilla (P) ja toinen puoli boorilla (B). [14, s.30, 34, 35.]

Fosfori muodostaa siteet neljän vierekkäisen piiatomien kanssa, ja viides elektroni siirtyy johtavuuskehälle. Tällöin auringosta saapuvat fotonit pystyvät helpommin aiheuttamaan

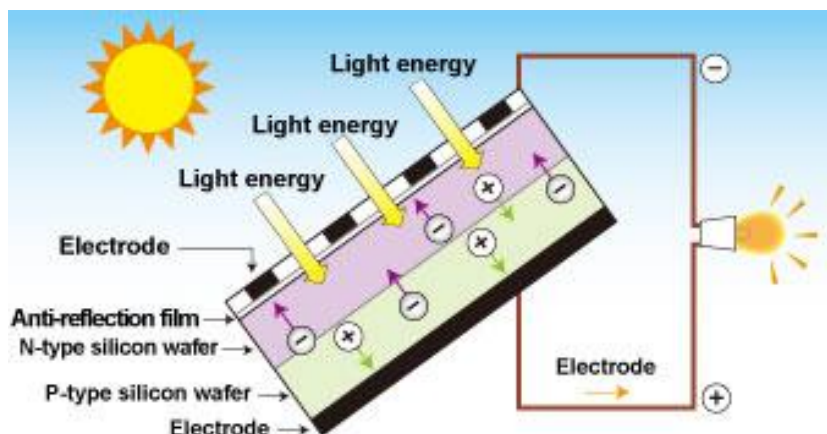
elektronien virittymistä aineessa. Fosforilla seostettua piitä kutsutaan n-puolijohteeksi, koska seoksessa on yksi elektroni johtavuusvyöllä. Boori muodostaa piiatomien kanssa vain kolme sidosta, jolloin sidokseen jää yhden elektronin suuruinen aukko valenssikehällä. Tätä seosta kutsutaan p-puolijohteeksi, koska muodostuvat ylimääräiset aukot katsotaan positiivisiksi varauksenkuljettajiksi. [14, s.33–34.]

N- ja p-tyyppisen piiseoksen rajapinnassa vapaiden elektronien ja aukkojen tiheydet muuttuvat rajusti. P-tyypissä on runsaasti aukkoja ja n-tyypissä vapaita elektroneja. Ns. diffuusioilmiö pyrkii tasoittamaan vapaiden elektronien ja aukkojen paikalliset tihentymät koko puolijohteeseen. N-tyypin vapaat elektronit liikkuvat p-tyyppiin ja ns. rekombinoituvat aukkoihin. Päinvastainen tapahtuu p-tyypin aukkojen suhteen, jotka matkaavat n-tyyppiin ja rekombinoituvat vapaiden elektronien kanssa. Piiseosten rajapintaan syntyy ns. tyhjennysalue, kun vapaat aukot ja elektronit häviävät rajapinnan alueelta. [14, s.35.]

Tyhjennysalueelle muodostuu ns. potentiaalivalli, sillä alueelta puuttuvat varauksenkuljettajat, mutta seosatomien varaukset ovat siellä edelleen tallessa. Rajapinnan p-puolijohteeseen syntyy negatiivinen varaustiheys booriatomin neljännen sidoselektronin saannin takia. N-puolijohteessa varaustiheys on positiivinen, koska fosforiatomit ovat menettäneet johtavuusvyön elektroninsa. [14, s.35.]

Piiseosten rajapinta suuntaa aukkojen ja elektronien liikettä siten, että n-puolijohteen vapaat elektronit kulkevat vain p-puolijohteeseen päin. Samoin p-puolijohteen aukot suuntaavat vain kohti n-puolijohdetta. Tämä puolijohderajapinta päästää virtaa lävitseen vain yhteen suuntaan. Kun puolijohteet yhdistetään johtimella taustoistaan toisiinsa, pyrkii aukot ja vapaat elektronit tasoittumaan. Näin johtimeen syntyy sähkövirta. [14, s.35.]

Kuva 9 havainnollistaa varausten ja sähkövirran liikettä.



Kuva 9. Aurinkokennon toiminta [22].

Auringon valo kohdistuu kennoon ja osalla fotoneista on niin suuri energia, että ne pääsevät ohuen pintakerroksen läpi pn-liitokseen ja muodostavat elektroni-aukkopareja. Elektronit kulkevat n-puolijohteen puolelle ja aukot p-puolijohteen. Puolijohteiden rajapinnan sähkökentän ansiosta elektronit voivat kulkea vain tiettyyn suuntaan, joten ne kulkeutuvat ulkoisen johtimen kautta p-tyypin puolijohteeseen jossa ne yhdistyvät sinne kulkeutuneiden aukkojen kanssa. Ulkoisessa johtimessa kulkee tasasähkövirta, jota voi käyttää sähkölaitteiden energialähteenä. [23.]

5.2 Aurinkokennojen perussuureet

Aurinkokennoista puhuttaessa on hyvä tietää sähköön muutama perussuure. Tärkeää on erottaa tehon ja energian käsitteet sekä tietää, mikä yhdistää sähkövirtaa, -jännitettä ja -tehoa.

Sähköteho P kuvaa jatkuvaa senhetkistä kulutusta tai tuotantoa, ja sen perussuure on watti (W). Käytetty tai varastoitu energia E saadaan, kun teho kerrotaan siihen kulutetulla ajalla. Energian suurena käytetään sähkötekniikassa yleensä kilowattituntia (kWh).

Lasketaan asian havainnollistamiseksi, kuinka paljon energiaa kuluu, kun pöytätietokonetta käytetään neljän tunnin verran. Sanotaan että tietokone käy 200 W:n teholla. Tästä voidaan laskea käytetty energia:

$$200 \text{ W} \cdot 4 \text{ h} = 800 \text{ Wh} = 0,8 \text{ kWh}$$

Neljän tunnin käytön jälkeen tietokone on kuluttanut siis 0,8 kWh energiaa.

Kun mikä tahansa koje kuluttaa sähköisesti tehoa, on yhtälössä olemassa myös sähköinen jännite ja -virta. Virran muodostuminen vaatii yleensä sähköisen potentiaalin. Kuluttajien lähin sähköinen potentiaali on yleensä seinäpistoke, jossa on jännitettä maahan nähden 230 voltia (V). Sähköopin yksi keskeisimmistä yhtälöistä sitoo tehon, jännitteen ja virran toisiinsa. Yhtälö on seuraava:

$$P = U \cdot I.$$

Yhtälössä P on teho (Wattia), U on jännite (Voltia) ja I on virta (Ampeeria).

Esimerkkinä voidaan laskea, kuinka paljon virtaa kuluu edellisen esimerkin tietokoneessa joka hetki. Tietokoneen teho oli 200 W ja pistokkeesta tuleva jännite 230 V. Jos halutaan tietää virta, täytyy yhtälöä hieman kääntää. Matematiikan perusteiden mukaan saadaan yhtälö muotoon

$$P = U \cdot I \quad \rightarrow \quad I = \frac{P}{U}$$

Sijoittamalla tiedetyt arvot saadaan yhtälö

$$I = \frac{200 \text{ W}}{230 \text{ V}} \approx 0,87 \text{ A}$$

Esimerkin tietokone käyttää siis joka hetki 0,87 ampeeria virtaa. [19, s.12–15.]

5.3 Aurinkokennomateriaalit

Käytetyimpiä piipohjaisia aurinkokennomateriaaleja ovat yksikiteiset ja monikiteiset piikennot sekä amorfiset aurinkokennot [14, s.43–45].

Näistä kolmesta materiaalista yksikiteiset tuottavat parhaan hyötysuhteen auringon energian muuttamisessa sähköksi. Hyötysuhde voi olla korkeintaan 31 %. Käytännössä yksikiteiset kennot tuottavat kuitenkin sähköä noin 17–21 % hyötysuhteella. [14, s.43–45.]

Monikiteiset piikennot ovat hinnaltaan edullisempia ja niiden hyötysuhde on välillä 16–19 %. Vaikka hyötysuhde monikiteisissä paneeleissa on pienempi, ovat ne vallanneet markkinat edullisuutensa vuoksi. [14, s.43–45.]

Amorfisesta piistä valmistetut kennot ovat ohutkalvopaneeleita. Ne kestävät taittelua ja sopivat hyvin esim. retkeilyssä rinkan kylkeen tai muihin vaativiin paikkoihin. Näiden paneelien hyötysuhde on kuitenkin vain 9–13 % ja sähköntuotto vähenee ajan mittaan nopeammin kuin yksi- ja monikiteisillä kennoilla. [14, s.43–45.]

Taulukossa 1 on ilmoitettu eri kennomateriaalin ominaisuuksia.

Taulukko 1. Kennomateriaalien ominaisuuksia [13, s.12].

Ominaisuudet	Kiteinen pii		Ohutkalvo			Orgaaninen
	Monikiteinen	Yksikiteinen	Amorfinen pii	CIS/CIGS	CdTe	
Hyötysuhde (%)	13–16 %	15–20 %	5–10 %	7–16 %	7–16 %	3–5 %
Lämpötilan vaikutus (STC) tehoon (% / +1 °C)	–0,42	–0,40	–0,1...–0,3	–0,35...–0,40	–0,25...–0,36	...
Mekaaninen kestävyys	hauras	hauras	joustava	joustava	joustava	joustava
Varjostus	herkkä	herkkä	sietää	sietää	sietää	sietää
Käyttöikä (vuotta)	30+	30+	30+	30+	30+	0,5–3
Hinta	€€	€€€	€€€	€€€	€€€	€

Eri lähteet ilmoittavat erilaisia hyötysuhteita piikennoille.

6 Lataussäädin

Lataussäätimen tehtävä aurinkosähköjärjestelmässä on ladata akku oikealla tavalla ja estää sen yllilatautuminen ja purkaantuminen. Lataussäädin alentaa aurinkopaneeleista tulevan jännitteen sopivaksi akun latausta varten. Laite pystyy seuraamaan myös sähkön kulutusta ja katkaisee virran kulutuskojeista, jos akun jännite laskee liian alhaiseksi. Erilaiset lataussäätimet pystyvät kertomaan, kuinka suurella virralla akku purkaantuu ja latautuu sekä kuinka suuri akun varaus on. Säätimistä löytyy yleensä myös sulakkeet ja pääkytkin, jotta kuormituksen voi tarvittaessa kytkeä irti akusta.

Nykyään käytetään suurimmaksi osaksi vain kahdentyyppisiä lataussäätimiä. PWM-säädin (Pulse Width Modulation) hyödyntää pulssinleveysmodulaatiota eli kytkee ja katkoo paneelin virtaa ja muuttaa kytkentä- ja katkaisuaikojen suhdetta niin, että paneelin jännite alenee sopivaksi akun lataamiseen. [14, s.70.]

MPPT-säädin (Maximum Power Point Tracking) pyrkii kuormittamaan aurinkopaneeleita suurimmalla mahdollisella teholla joka hetki, vaikka auringon säteily, paneelin lämpötila ja akun varaustila muuttuvat. MTTP-säädin kokeilee ja vertaa koko ajan paneelista otettavaa jännitettä. Jos teho nousee jännitettä nostaessa, testaa säädin vielä korkeampaa jännitettä. Jos teho alkaa jännitettä nostaessa laskea, ymmärtää säädin laskea jännitettä. Tällä tavoin säädin takaa paneeleista saatavan maksimaalisen tehon. [14, s.72.]

Kuvassa 10 on PWM-lataussäädin ja kuvassa 11 MPPT-lataussäädin.



Kuva 10. 20 ampeerin PWM-lataussäädin [24].



Kuva 11. 20 ampeerin MPPT-lataussäädin [24].

Kuvan 10 PWM-lataussäädin maksaa verkkokaupan mukaan 79 euroa ja kuvan 11 MPPT-säädin 190 euroa [24].

7 Invertteri

Invertteri muuntaa aurinkopaneeleista saadun 12 V:n tai 24 V:n tasasähkön 230 V:seksi vaihtosähköksi [14, s.75]. Tämä on tarpeen, jos halutut kulutuskojeet eivät toimi 12:n tai 24 V:n tasasähköllä. Esimerkiksi pölynimurit, vedenkeittimet ja TV:t ovat yleensä tällaisia verkkosähköllä toimivia kojeita.

Invertteri tekee vaihtosähköä katkomalla aurinkopaneelin tuottamaa tasasähköä, vaihtamalla sen suuntaa ja kasvattamalla jännitteen moninkertaiseksi [14, s.75].

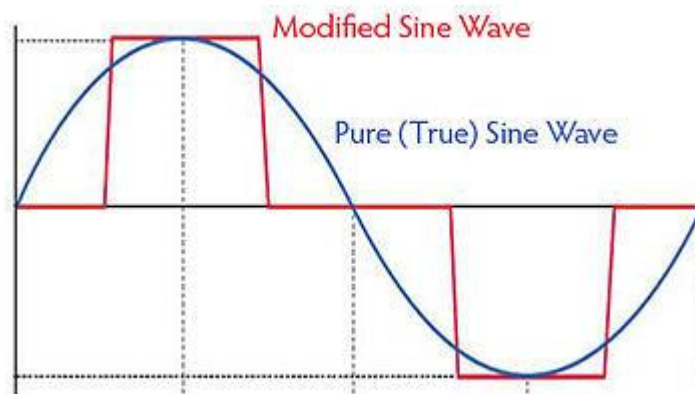
Kuvassa 12 on siniaaltoja tuottava invertteri.



Kuva 12. Siniaaltoja tuottava invertteri [25].

Invertterit tuottavat yleensä joko modifioitua tai aitoa siniaaltoja. Halvemmat invertterit tuottavat modifioitua siniaaltoja, jota voi käyttää esimerkiksi voimatyökalujen sähköinä. Herkät laitteet, esim. tietokoneet, voivat ottaa häiriöitä modifioidusta siniaallosta. [14, s.75.]

Kuvassa 13 on modifioitu ja aito siniaalto.



Kuva 13. Modifioitu ja aito siniaalto [26].

Puhdasta siniaaltoja tuottavat invertterit maksavat noin 200–800 euroa, kun taas modifioitua siniaaltoja tuottavia invertterejä saa hintaluokasta 30–200 euroa. Hintaluokat näyttävät määräytyvän invertterin antaman maksimitehon mukaan. [25.]

Hyvät invertterit voivat toimia 90 %:n hyötysuhteella. Jos invertteriä ei käytetä, se kuluttaa kumminkin joutokäyntivirtaa, joka voi olla 0,5–4 ampeeria. Kilowatin tehoinen

invertteri voi ottaa 12 voltin akusta jopa 100 ampeerin virran. Tämän takia kannattaa käyttää lyhyitä ja paksuja johtimia akun ja invertterin välissä sekä isoa sulaketta. [14, s.77–78.]

Jos aurinkosähköjärjestelmä halutaan liittää valtakunnan verkkoon, tarvitaan jakeluyhtiön vaatimukset täyttävä verkkoinvertteri. Tämä invertteri tuottaa samanlaista sinimuotoista vaihtojännitettä kuin verkossa ja se tahdistuu verkon taajuuteen. [14, s.78.]

Mikroinvertterit ovat yksittäisiin aurinkopaneeleihin asennettavia pienempiä invertterejä. Ne tuottavat sähköä toisista paneeleista riippumatta, jos jotkin paneelit ovat varjossa tai lumen ja lehtien peitossa. Mikroinvertterien asentaminen kasvattaa kuitenkin järjestelmän hintaa, jolloin vianetsintä ja korjaus on vaikeampaa. [14, s.81.]

8 Akku

8.1 Akku varastointimuotona

Yksi suurimmista haasteista aurinkopaneelijärjestelmissä on energian varastointi. Aurinko ei luonnollisesti paista ympäri vuorokauden, joten jonkinlainen varastointi on tarpeen. Vesivoimaloissa varastointi tehdään patoamalla vettä korkeaan potentiaaliin, jolloin sitä voi valuttaa turbiinin läpi tarpeen vaatiessa. Kivihiili- ja ydinvoimaloissa energia on varastoitu itse polttoaineeseen. Aurinkopaneelijärjestelmissä varastointi tehdään akkujen avulla. Tämä on paras tämänhetkinen tapa varastoida aurinkosähköä, vaikkakin akut ovat kalliita, vaativat huolenpitoa ja niiden käyttöikä on rajallinen.

Lyijyakut ovat tällä hetkellä ylivoimaisesti käytetyin muoto varastoida pienempiä määriä aurinkosähköä esim. kesämökeillä. Litiumakut ovat toinen vaihtoehto energian varastoinnissa, mutta ne eivät ole vielä yleistyneet mm. korkean hintansa takia. Litiumakkujen arvellaan kuitenkin olevan tulevaisuus aurinkoenergian varastoinnissa, ellei muita mahdollisia teknologioita ilmaannu. [14, s.53, 69; 26.]

Akun varauskapasiteettia eli varauskykyä, merkitään kirjaimella C (capacity) ja se ilmoitetaan ampeeritunteina (Ah). Jos akun varauskyky on 50 Ah, pystyy akusta ottamaan

yhden ampeerin virran 50 tunnin ajan. Usein on kuitenkin tärkeämpi tietää, paljonko energiaa akkuun voi säilöä. Kun varauskapasiteetin kertoo akun jännitteellä, saadaan akkuun mahtuva energiamäärä, joka ilmoitetaan yleensä kilowattitunteina (kWh). Esimerkiksi 12 voltin ja 50 ampeeritunnin akkuun mahtuu energiaa

$$W = 12 \text{ V} \cdot 50 \text{ Ah} = 600 \text{ Wh} = 0,6 \text{ kWh. [14, s.55–56.]}$$

Lyijyakuissa on tavallisesti 6 kpl 2 voltin kennoja sarjaan kytkettynä, jolloin nimellisjännite on 12 V. Akkujen jännite ei kuitenkaan lähes koskaan ole tasan 12 voltia. Tyhjän akun jännite on noin 11,5 V ja täyteen ladatun 12,7 V. Kuitenkin suurilla virroilla purettaessa jännite voi laskea jopa 10 volttiin ja ladattaessa nousta 16 volttiin. [14, s.56.]

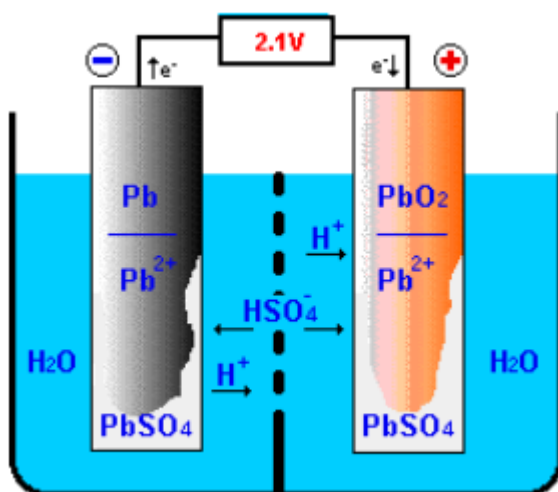
Akkujen lataus tulee tehdä oikeaoppisesti. Tämä estää lyijyakuissa kaasujen ylimääräistä muodostumista ja levyjen sulfatoitumista. Lyijyakut on hyvä ladata ensin vakiovirralla ja sen jälkeen vakiojännitteellä, seuraten akun jännitettä ja lämpötilaa koko ajan. [14, s.58.]

8.2 Lyijyakut

Lyijyakun toiminta perustuu varauksenkuljettajamolekyyleihin. Yhden akkukennon muodostavat anodi, joka on lyijylevy (Pb) ja katodi, joka on lyijydioksidilevy (PbO_2). Nämä on upotettu vedestä (H_2O) ja rikkihaposta (H_2SO_4) tehtyyn elektrolyytinesteeseen.

Akkua purettaessa anodi ja katodi yhdistetään ulkopuolelta, jolloin molemmat lyijylevyt alkavat sulfatoitumaan eli muodostamaan lyijysulfaattia (PbSO_4). Anodilla lyijylevy luovuttaa elektroneja johtimia pitkin ja yhtyy sulfaatti-ioniin (SO_4). Katodin lyijydioksidi ottaa elektroneja vastaan ja happiatomit käyttävät nämä elektronit yhtyäkseen elektrolyysinesteen vetyyn tullakseen vedeksi. Kun happiatomi erkanee lyijylevystä vetenä, yhtyy lyijylevy nesteen sulfaatti-ioniin ja syntyy lyijysulfaattia.

Akkua ladattaessa toiminta on päinvastaista. Molemmat lyijylevyt menettävät sulfaatti-ioninsa ja lyijyoksidi levy saa lisähapetta lyijyakkuun lisättävästä tislatus vedestä. Kuva 14 esittää lyijyakun sähköistä purkautumista. [28.]



Kuva 14. Varauksenkuljettajamolekyylit liikkuvat lyijylevyjen välillä [29].

Kuvassa 14 molemmat lyijylevyt sulfatoituvat (PbSO_4), kun elektronit virtaavat anodilta katodille.

Lyijyakkuja on erilaisia. Neste- eli flood-akuissa anodi- ja katodilevyt ovat upotettu rikkihapon ja veden yhdisteeseen. Näihin akkuihin on lisättävä tislattua vettä säännöllisesti, koska latauksen pitkittyessä latausvirta alkaa hajottaa elektrolyysinesteen vettä vety- ja happikaasuiksi. Nämä kaasut ovat suljetussa ja huonosti ilmastoidussa tilassa erittäin räjähdysherkkiä. Nesteakkuja täytyy pitää aina pystyasennossa, jotta veden lisäämiseen tarkoitetut tulpat eivät ala vuotaa elektrolyytinestettä ulos. [14, s.53–54.]

Huoltovapaissa akuissa (Maintenancefree Battery) ja VRLA-akuissa (Valve Regulated Lead Acid Battery) kennojen kaasut eivät pääasiassa purkaannu, koska kennot ovat suljettuja. Kun näiden akkujen varaus täyttyy, on lataus lopetettava ennen kuin kaasua pääsee kertymään liiaksi. Jos kennossa on vain vähän kaasua, se rekombinoituu takaisin vedeksi, eikä aiheuta harmia. Rekombinaatiossa happi ei nouse nesteen pinnalle, vaan matkustaa positiiviselta lyijylevyltä negatiiviselle, missä se yhtyy vedyn kanssa vedeksi. [30.]

Kennoissa on kuitenkin varaventtiili, jos kaasuja kertyy liikaa. Näin ollen liiat kaasut pääsevät pakenemaan. Näihin akkuihin ei voida lisätä tislattua vettä, joten veden kaasujen

menetys on lopullinen ja akun varauskapasiteetti alenee nesteen vähentyessä. [14, s.53.]

AGM-akuissa (Absorbed Glass Mat Battery) anodi- ja katodilevyjen välissä on lasikuitumatto, johon elektrolyytineste on imeytetty. Nämä akut ovat suljettuja ja huoltovapaita, ja ne voi asentaa mihin tahansa asentoon, paitsi ei ylösalaisin. Myös näiden akkujen kennoissa on varaventtiili liiallisten kaasujen poistoon. [14, s.54.]

Geeliakuissa elektrolyysinesteen on sekoitettu piigeeliä, joka muuttaa nesteen hyytelömäiseksi. Hyytelö pitää anodi- ja katodilevyjä erillään toisistaan. Geeliakut ovat myös suljettuja, ja niiden kennoissa on varaventtiilit. [14, s.55.]

Aurinkosähköjärjestelmissä on yleisesti käytetty suljettuja AGM- ja geeliakkuja. Näiden akkujen täytyy olla syväpurkausakkuja (Deep Cycle Battery), jotka kestävät varauksen hitaan ja pitkälle menevän purun. Syväpurkausakuissa on paksut liijylevyt, toisin kuin autojen käynnistysakuissa, jotka pystyvät antamaan suuren virran ohuempien levyjensä ansiosta. Käynnistysakut eivät kestä varauksen purkamista liian pitkälle. Käynnistysakun voi purkaa tyhjäksi noin 10–12 kertaa, kun syväpurkausakun noin 150–200 kertaa. [14, s.55, 57.]

8.3 Litium-ioniakut

Suurin osa litium-ioniakuista käyttävät litium-ioneita (Li^+) varauksen kuljettajina. Anodina on yleensä kuparivuorattu grafiitti ja katodina alumiinivuorattu metallioksidi. Akkusolussa elektrolyytinä toimii litiumsuola epäorgaanisessa liuottimessa. Elektrolyytti on ioninen johde ja elektroninen eriste. [31; 32.]

Kun litiumakku on tyhjä, ovat kaikki varauksenkuljettajat sitoutuneet katodiin. Litiumakua ladataessa katodin materiaali, litiumkobolttioksidi (LiCoO_2), hapettuu ja litium-ionit erkaantuvat materiaalin väleistä. Ionit liikkuvat elektrolyyttiä pitkin anodille grafiittimateriaalin (Li_xC_6) väleihin. [33.]

Litiumakkua purettaessa reaktio on päinvastainen. Erona kuitenkin sama määrä elektrolyytissä kulkevia varauksia kulkee myös ulkoista virtapiiriä pitkin ja uudistaa katodimateriaalia. Kuva 15 esittää litiumakkusolun latauksen ja purkauksen. [33.]



Kuva 15. Kuvassa litium-ionit liikkuvat akkua ladattaessa ja purettaessa [31].

Litium-ioniakut ovat nimetty niiden aktiivisten materiaalien mukaan. Litiumkobolttiakuista on tullut suosittuja mm. kännyköissä kannettavissa tietokoneissa ja digitaalikameroissa suuren energiasisältönsä vuoksi. Tämän akkutyypin huonoja puolia ovat suhteellisen lyhyt elämänskaari, huono lämpötasapaino ja rajallinen latausominaisuus. Litiumkobolttiakkuja ei tule ladata virroilla jotka ylittävät sen C-luokituksen. Jos akun energiasisältö on esim. 2400 mAh, latausvirran ei tule olla yli 2400 mA. [31.]

Litium-mangaaniakun (LiMn_2O_4) arkkitehtuuri suo sille matalamman sisäisen resistanssin ja tämän myötä paremman virrankäsittelyn. Lataus ja purku onnistuvat isommilla virroilla. Myös lämpötilan vaihtelu on stabiilimpaa, joka tekee akusta turvallisen. Näitä akkuja käytetään lääketieteessä, työkalujen akkuina, sekä sähköautojen akkuina. Elinkaari litium-mangaaniakulla on kobolttiakkuu huonompi. [31.]

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttiakulla (LiNiMnCoO_2) eli lyhyemmin NMC-akulla on erittäin suuri energiasisältö. Myös virransieto on näissä akuissa korkea. NMC-akkuja käytetään myös työkalujen akkuina, sekä sähköpolkupyörissä. Nikkeli on halvempaa kuin koboltti, joten NMC-akkujen valmistus on huokeampaa. Näillä akuilla on myös korkeampi energiasisältö ja elinkaari, mutta pienempi jännite kuin litiumkobolttiakuilla. [31.]

Litiumrautafosfaattiakun (LiFePO_4) katodi on nanokokoista fosfaattimateriaalia. Tämän tyyppin akuilla on pitkä purkausikä, hyvä lämpötasapaino, ja ne kestävät kaltoin kohtelua. Litiumrautafosfaattiakkuja on käytetty korvaamaan autojen käynnistysakkuja, koska niiden paneeleiden yhteenlaskettu jännite on hyvin lähellä lyijyakkujen jännitettä. [31.]

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (LiNiCoAlO_2) tai NCA-akku tarjoaa kohtuullisen tehonannon ja pitkän eliniän. Nämä akut eivät kuitenkaan ole niin turvallisia kuin muut vaihtoehdot, ja hintakin ovat suhteellisen korkea. [31.]

Litium titaniittiakkua ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) eli LTO-akkua pystytään purkamaan ja lataamaan nopeasti. Alhaisissa lämpötiloissa tämä akku toimii hyvin samoin kuin korkeissa. Akun hinta on kuitenkin korkea. [31.]

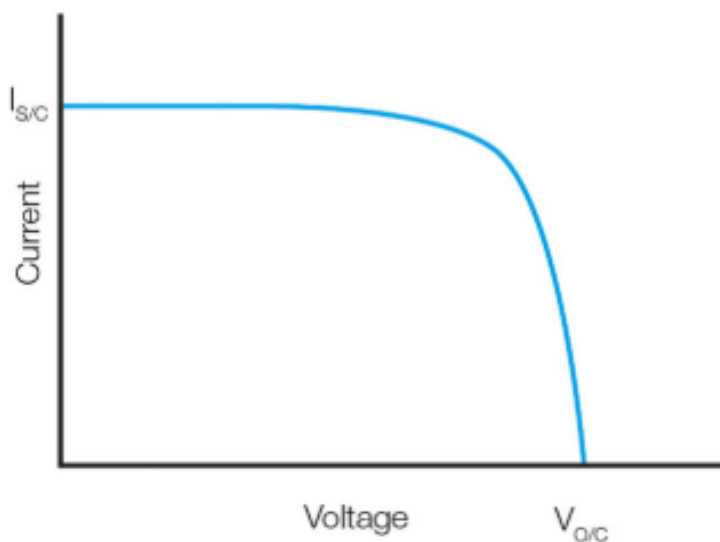
9 Aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittaus

9.1 Mittauksen tarkoitus

Aurinkopaneelin ominaiskäyrän mittauksen tarkoituksena oli selvittää aurinkopaneelin tehontuotto ja luoda siitä kuvaaja.

”Aurinkopaneelin ominaiskäyrä esittää paneelin antaman jännitteen ja virran välisen riippuvuuden” [14, s.48].

Kuvassa 16 on tyypillinen aurinkopaneelin ominaiskäyrä.

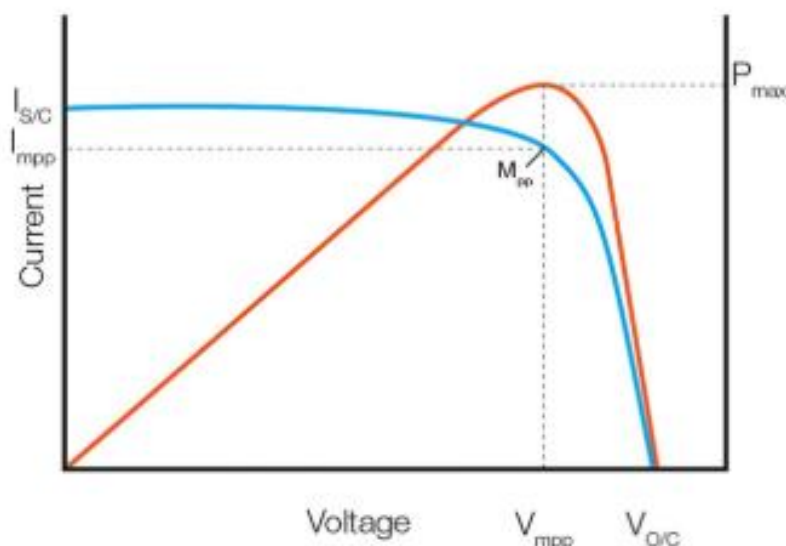


Kuva 16. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä [34].

Aurinkopaneeleiden ominaiskäyrät noudattavat kuvan 16 käyrää. Kuvasta 16 näkee virran (current) olevan maksimissaan, kun jännite (voltage) on nolla, eli kun piiri on oikosulussa (short circuit). Jännite on maksimissaan silloin, kun virta on nolla, eli kun virtapiiri on auki (open circuit).

Aurinkopaneelin tehontuotto riippuu siitä, millä jännitteellä sitä kuormitetaan. Paneelin suurimman tehon tuoton voi löytää muuttamalla kuormittavaa virtaa pienin askelin. [14, s.50.]

Kuvassa 17 on esitetty ominaiskäyrän päällä tehokäyrä.



Kuva 17. Aurinkokennon tehokäyrä [34].

Kuvassa 17 suurimman tehon pisteen P_{max} (MPP, Maximum Power Point) löytää kohdasta, jossa virran ja jännitteen tulo on maksimissaan.

Mittasin aurinkopaneelin tehontuoton aurinkoisella ja pilvisellä kesäsäällä ja vertasin saamiani tuloksia aurinkopaneelin ilmoitettuihin arvoihin.

9.2 Mittausvälineet ja kytkentä

Ominaiskäyrän mittauksen tein netistä hankkimieni tietojen avulla. Lähteessä ilmoitettiin tarvittaviksi komponenteiksi aurinkopaneeli, yleismittari, säädettävä vastus ja johtoja [35]. Lisäksi mittauksia tehdessäni huomasin, että yleismittari ei pysty mittaamaan virtoja kahden desimaalin tarkkuudella, kun virrat ovat välillä 330 mA ja 600 mA. Tämän takia lisäsin tehovastuksen (PRC PLV7) kytkentään sarjaan ja pystyin vastusarvon ja vastuksen yliolevan jännitteen avulla laskemaan virran. Tarvittavat välineet hankin sukulaiseltani, jolta löytyi yleismittarien lisäksi elektroninen säädettävä kuorma, sekä tehovastus.

Mittausvälineet olivat:

- aurinkopaneeli (Allpowers AP-SP-009-BLA)
- 2 * yleismittari (FLUKE 77)
- elektroninen säädettävä kuorma (ELU-200)
- tehovastus (PRC PLV7)
- johtimia.

Mittauksessa käyttämäni aurinkopaneeli oli ostettu kuluttajille suunnatusta amerikkalaisesta nettikaupasta. Paneeli oli suunnattu auton 12 V:n akun jännitteen ylläpitämiseen. Valitsin paneelin, koska siinä ei ole ylimääräistä elektroniikkaa kuten USB-portteja, jotka automaattisesti tasaavat jännitteen 5 V:iin. Kyseinen paneeli on kuvassa 18.



Kuva 18. Mittauksissa käytetty aurinkopaneeli [36].

Aurinkopaneelistä oli ilmoitettu seuraavat tiedot:

- 18V 10W High efficiency monocrystalline solar panel
- no-load voltage 18–23 VDC
- load voltage 12 V
- output current: 400mAh–550 mAh (max.).

Aurinkopaneelille oli ilmoitettu virheellisesti ulostulovirran arvoksi mAh (milliampeerituntia), joka on sähkövarauksen eikä virran arvo. Pitäisi olla pelkästään mA (milliampeeria). Näitä aurinkopaneelin ilmoitettuja arvoja vertailin mittauksissa saamiini tuloksiin.

Jännite/virtamittarien merkki oli Fluke77. Tarvitsin mittauksessa kaksi mittaria, joissa toisella mittasin aurinkopaneelin jännitettä ja toisella virtapiirin virtaa. Fluke77 mittarit ovat kuvissa 19 ja 20.



Kuva 19. Fluke 77 yleismittari 1.



Kuva 20. Fluke 77 yleismittari 2.

Elektronista säädettävää kuormaa ELU-200 käytin, koska sillä pystytään säätämään virta vakioksi. Tämä mahdollisti helpon virran ja jännitteen mittauksen. Säädettävä kuorma on kuvassa 21.



Kuva 21. Elektronien säädettävä kuorma ELU-200.

Tehovastusta PRC PLV7 ($0,1 \Omega \pm 0,05 \%$) käytin saadakseni tarkemmat mittaustulokset [37]. Aurinkopaneelin tuottama virta pystyy paneelin tietojen mukaan nousta 550 mA:iin, mutta FLUKE 77 pystyy mittaamaan kahden desimaalin tarkkuudella pieniä virtoja vain 330 mA:iin asti. Kun kytken tehovastuksen virtapiirissä sarjaan, pystyn mittaamaan jännitteen vastuksen yli ja saan näin tietää piirin virran tarkemmin. Käytän virran laskemiseen kaavaa

$$U = R * I.$$

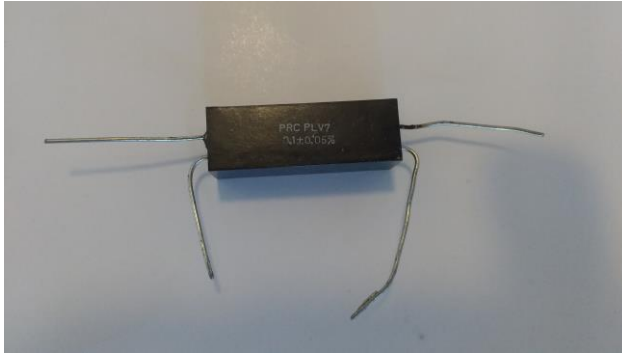
Saman kaavaan voi muuttaa muotoon

$$I = \frac{U}{R}.$$

Sijoittamalla yhtälöön vastuksen arvon $0,1 \Omega$ saadaan tietoon virta, kun jännite kerrotaan kymmenellä. Tämän osoittaa yhtälö

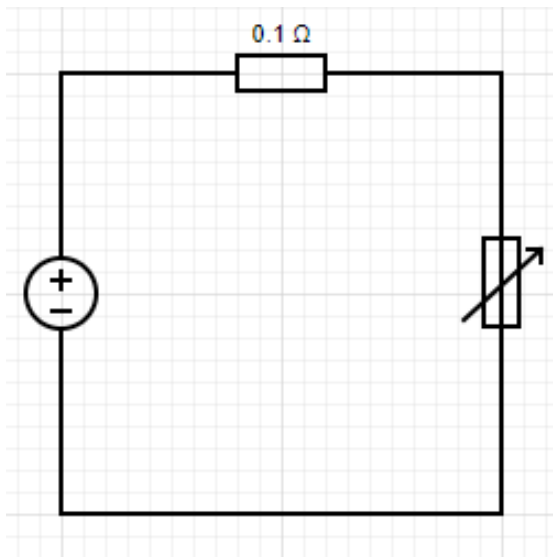
$$I = \frac{U}{0,1 \Omega} = U * 10 \Omega.$$

Tehovastus on kuvassa 22.



Kuva 22. Tehovastus PRC PLV7.

Kytkentäkaavio työssä oli erittäin yksinkertainen. Kytkentäkaavio on kuvassa 23.



Kuva 23. Mittauksen kytkentäkaavio.

Mittasin kytkennässä yleismittareilla jännitelähteen eli aurinkopaneelin jännitettä sekä $0,1 \Omega$ vastuksen jännitettä. Vastuksen läpi kulkevan virran sain edellä luvussa esitellyllä laskukaavalla. Kuvan säädettävä vastus oli elektroninen säädettävä kuorma ELU-200, joka mahdollisti kytkennän virran pitämisen vakiona.

9.3 Mittaukset

Tein mittaukset pilvettömänä kesäpäivänä sekä pilvisellä säällä. Mittaukset tapahtuivat elokuussa 2018. Tulokseksi sain kyseisen aurinkopaneelin ominaiskäyrän pilvettömänä ja pilvisenä päivänä. Kuvissa 24 ja 25 nähdään aurinkoisen päivän taivas ja pilvisen päivän taivas.



Kuva 24. Aurinkoinen mittauspäivä 11.8.2018.



Kuva 25. Pilvinen mittauspäivä 4.8.2018.

Aurinkoisen päivän mittaukset tehtiin 11.8.2018 klo 11:00 ja pilvisen 4.8.2018 klo 12.30. Lämpötila mittaushetkellä aurinkoisena päivänä oli noin 25 °C ja pilvisenä noin 23 °C. Asetelma mittauspäivinä oli kuvien 26 ja 27 mukainen.



Kuva 26. Mittauksessa käytetty aurinkopaneeli.



Kuva 27. Mittauksen kytkentä.

Aloitin työn tarkistamalla mittareiden toimivuuden. Testasin 10 Ω :n ja 1000 Ω :n vastuksia ja sain resistanssinmittausalueella lähestulkoon kyseiset arvot. Tämän jälkeen tein edellisen osion mukaiset kytkennät ja suuntasin aurinkopaneelin kohtisuoraan aurinkoa kohti. Aurinko oli silmämääräisesti noin 45 asteen kulmassa horisonttiin nähden.

Kun kytkentä oli valmis, mittasin aurinkopaneelin avoimen piirin jännitteen ja sitten oikosulkuvirran. Tämän jälkeen mittasin säädettävää kuormaa apuna käyttäen piirin jännitteet nousevilla virran arvoilla nollasta oikosulkuvirtaan asti. Mittasin jännitteet 25 mA:n välein. Saamalla virran arvot ja niitä vastaavat jännitteet, pystyn piirtämään aurinkopaneelin ominaiskäyrän.

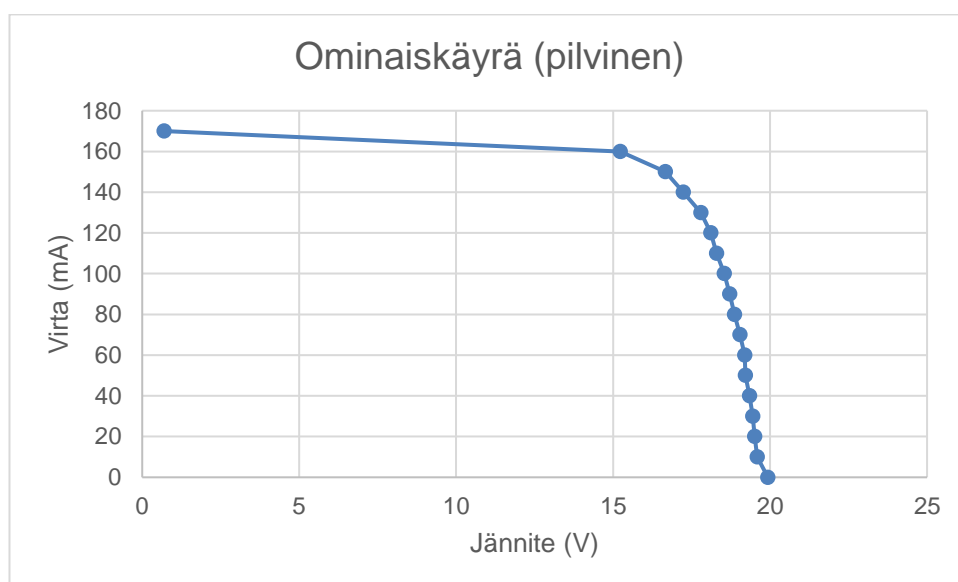
Tein mittaukset kahtena eri päivänä, joten pyrin tekemään kytkennät samassa järjestyksessä sekä samaan kellonaikaan. Mittauksilla oli viikko väliä.

Seuraavassa osiossa kerron mittauksissa saamani tulokset.

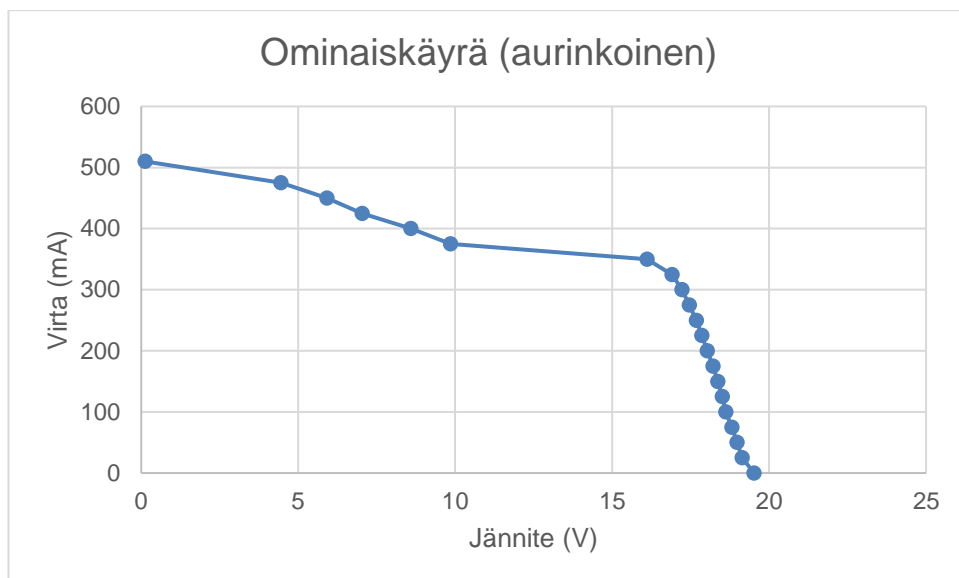
9.4 Tulokset

Sain mittauksista tulokseksi kaksi ominaiskäyrää. Toinen kuvaa aurinkopaneelin virran ja jännitteen suhdetta aurinkoisella säällä ja toinen pilvisellä. Mittaustulokset ovat liitteessä 1.

Kuvissa 28 ja 29 on pilvisen ja aurinkoisen päivän ominaiskäyrien kuvaajat.



Kuva 28. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä pilvisellä säällä.



Kuva 29. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä aurinkoisella säällä.

Kuvista 28 ja 29 nähdään, että aurinkopaneelin tehontuotto noudattaa ominaiskäyrän muotoa. Alemmassa taulukossa on esitetty aurinkoisen ja pilvisen päivän oikosulkuvirrat ja avoimen piiriin jännitteet. Taulukkoon 2 on myös merkitty aurinkopaneelivalmistajan antamat maksimivirrat ja jännitteet.

Taulukko 2. Pilvisen ja aurinkoisen päivän oikosulkuvirrat ja avoimen piiriin jännitteet.

	Pilvinen päivä	Aurinkoinen päivä	Aurinkopaneelin tiedot
Oikosulkuvirta	170 mA	510 mA	400–550 mA
Avoimen piiriin jännite	19,93 V	19,52 V	18–23 VDC

Aurinkopaneelin ilmoittamat tiedot avoimen piiriin jännitteen osalta vastaavat mittaustuloksia. Pilvisen ja aurinkoisen päivän virranannon ero oli huomattava. Aurinkopaneelin napojen oikosulkeminen virtamittarin läpi pilvisenä päivänä tuotti vain 170 mA:n virran. Aurinkoisena päivänä vastaava arvo oli 510 mA.

Oikosulkuvirta ei kuitenkaan tuota tehoa, koska jännite on silloin hyvin lähellä nollaa. Aurinkopaneelin ilmoitettu kuormajännite oli 12 V. Mittaustulosten mukaan tämän jännitteen hetkellä pilvisenä päivänä virta oli noin 160 mA ja aurinkoisena päivänä n. 375 mA. Maksimi tehon piste (MPP) oli mittaustulosten mukaan pilvisenä päivänä 16,66 voltin

kohdalla noin 2,5 W. Aurinkoisena päivänä maksimi tehon piste oli 16,11 voltin kohdalla noin 5,6 W.

Aurinkopaneelin tehontuotto oli odotetusti huomattavasti korkeampi aurinkoisena päivänä, kuin pilvisenä päivänä.

10 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin valon syntyä auringossa ja sen matkaa avaruuden halki maapallolle. Piipohjaisen aurinkopaneelin sähköntuotto ja aurinkosähköjärjestelmän keskeisimmät komponentit selvitettiin. Komponentit, joihin paneuduttiin, olivat aurinkopaneeli, akusto, lataussäädin ja invertteri.

Työssä hankittiin kuluttajille suunnattu piipohjainen monokristalliaurinkopaneeli ja sen ominaiskäyrä mitattiin. Mittaukset tapahtuivat elokuussa 2018 aurinkoisella ja pilvisellä säällä. Aurinkoisien sään mittaustulokset olivat lähellä paneelin ilmoitettuja tietoja, mutteivät kuitenkaan täysin täyttäneet annettuja jännitteen ja virran arvoja. Pilvisen sään mittaustulokset eivät täyttäneet aurinkopaneelin ilmoitettuja arvoja.

Aiheen rajaus teki työstä haastavan. Jo yksittäisestä aurinkosähköjärjestelmän komponentista voi tehdä pitkän selvityksen. Katsaus järjestelmän osiin ja kokonaisuuden hahmottaminen oli itselleni alussa haasteellista.

Opin työssä asiakokonaisuuksien jäsentelyn tärkeyttä ja työ auttaa minua jatkossa pitämään silmällä selkeyttä ja johdonmukaisuutta tutkimustyössä. Työn suunnittelu ja aikataulutus osoittautui myös tärkeäksi asiaksi, joka auttaa huomattavasti työtaakan tasoitamisessa.

Opinnäytetyö antaa lukijalle katsauksen aurinkosähkön kiertokulkuun ja auttaa ymmärtämään sitä kokonaisuutena.

Lähteet

- 1 Green, Lucie. 2016. 15 Million Degrees. Penguin Books.
- 2 Our Sun. 2018. Verkkoaineisto. NASA. <<https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/>>. 9.4.2018. Luettu 12.7.2018.
- 3 Sun Fact Sheet. 2018. Verkkoaineisto. NASA. <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>>. 23.2.2018. Luettu 12.7.2018.
- 4 NASA Image and Video Library. 2018. Verkkoaineisto. NASA. <<https://images.nasa.gov/search-results?q=sun&page=1&media=image&yearStart=1920&yearEnd=2018>>. Luettu 12.7.2018.
- 5 Tahkokorpi, Markku. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Dardedze Holografija, Riika.
- 6 Qiang Fu. Radiation (Solar). 2018. Verkkoaineisto. <http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter3/Ency_Atmos/Radiation_Solar.pdf>. Luettu 5.6.2018.
- 7 Proton-proton reaction chain. 2018. Verkkoaineisto. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Proton-proton_reaction_chain.svg>. Luettu 31.5.
- 8 Inkinen, Pentti & Manninen, Reijo & Tuohi, Jukka. 2002. Momentti 2 Insinööri-fysiikka. Otava.
- 9 What exactly is a photon? 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.zmescience.com/science/what-is-photon-definition-04322/>>. 23.6.2017. Luettu 5.6.2018.
- 10 Electromagnetic Radiation. 2018. Verkkoaineisto. <<https://byjus.com/physics/electromagnetic-radiation/>>. Luettu 10.7.2018.
- 11 The Electromagnetic Spectrum: The Family of Light. 2018. Verkkoaineisto. <http://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm>. Luettu 10.7.2018.
- 12 Valosähköinen ilmiö. 2009. Verkkoaineisto. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xqbJJS8nRNMJ:https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/582435/mod_folder/content/0/vsi_ohje.pdf%3Fforcedownload%3D1+&cd=7&hl=fi&ct=clnk&gl=fi>. Luettu 9.8.2018.

- 13 ST-käsikirja 40. 2018. Verkkoaineisto. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/6682?search=aurinko>>. 19.9.2017. Luettu 9.8.2018.
- 14 Perälä, Rae. 2017. Aurinkosähköä. Alfamer / Karisto Oy.
- 15 Gray, Theodore. 2015. Kiehtovat alkuaineet. Docendo.
- 16 Tiede lapsille. 2018. Verkkoaineisto. <https://sites.google.com/site/naukaza-decu/fizika-za-osmaka/elementiatomskeinuklearnefizike>>. 17.5.2018. Luettu 3.9.2018.
- 17 What are the exact relative masses of protons, neutrons and electrons? 2018. Verkkoaineisto. < https://education.jlab.org/qa/particlemass_02.html>. Luettu 27.8.2018.
- 18 Comparison of a Semiconductor Atom to a Conductor Atom. 2017 Verkkoaineisto. <https://electronics143.wordpress.com/2017/03/05/comparison-of-a-semiconductor-atom-to-a-conductor-atom/>. 5.3.2017. Luettu 27.8.2018.
- 19 Kämpylehto, Janne. 2014. Mökille sähköt auringosta ja tuulesta. Into kustannus Oy.
- 20 Aurinkosähköjärjestelmän asennus. 2018. Verkkoaineisto. < <https://www.jn-solar.fi/fi/content/14-aurinkosahkojarjestelman-asennus>>. Luettu 5.10.2018.
- 21 Virtaa auringosta! 2018. Verkkoaineisto. < <https://www.hongkong.fi/fi/info/vinkit-aurinkoenergia.html>>. Luettu 5.10.2018.
- 22 What is PV? 2011. Verkkoaineisto. <http://www.kitagawaseiki.co.jp/en/ji-gyo_pv.html>. Luettu 9.7.2018.
- 23 Aurinkopaneelit. Verkkoaineisto. <<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>>. Luettu 12.10.2018.
- 24 Lataussäätimet. 2018 Verkkoaineisto. < <https://www.aurinkopaneelikauppa.fi/Lataussaeatimet>>. Luettu 27.9.2018.
- 25 Motonet, invertterit. 2018. Verkkoaineisto. < <https://www.motonet.fi/fi/kategoria/1303/42409/Invertterit>>. Luettu 7.8.2018.
- 26 Itechworld Fact sheet. Verkkoaineisto. <https://itechworld.com.au/blogs/learn/91661318-itechworld-fact-sheet-pure-sine-wave-vs-modified-sine-wave>. Luettu 7.8.2018.

- 27 Why the future of batteries is lithium and why their impact will be bigger than you think. 2017. Verkkoaineisto. <<http://energypost.eu/future-batteries-lithium-impact-will-bigger-think/>>. 15.12.2017. Luettu 31.5.2018.
- 28 Lead-Acid Battery. Verkkoaineisto. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/leadacid.html>>. Luettu 12.6.2018.
- 29 Characteristics of the Lead-Acid Battery. 2009. Verkkoaineisto. <<http://www.siranah.de/html/sail080e.htm>>. 10.3.2009. Luettu 12.6.2018.
- 30 About batteries: recombinant batteries. 2018. Verkkoaineisto. <<http://www.hefra.nl/docs/webshop.asp?act=doc&id=4823>>. Luettu 31.5.2018.
- 31 Battery University. 2018. Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lithium_based_batteries>. Luettu 13.6.2018.
- 32 How Cells Work. 2016. Verkkoaineisto. <<http://www.jmbatterysystems.com/technology/cells/how-cells-work>>. Luettu 13.6.2018.
- 33 How does a lithium-ion battery work, and why are they so popular? 2014. Verkkoaineisto. <<https://www.extremetech.com/extreme/184236-how-does-a-lithium-ion-battery-work-and-why-are-lithium-ion-batteries-so-popular>>. 12.6.2014. Luettu 13.6.2018.
- 34 What is solar PV I-V curve tracing? 2018. Verkkoaineisto. <<http://www.seawardsolar.com/userfiles/curve-tracing.php>>. Luettu 25.9.2018.
- 35 How to measure a solar cell's power output. 2018. Verkkoaineisto. <https://www.instructables.com/id/How-to-Measure-a-Solar-Cells-Power-Output/>. Luettu 31.5.2018
- 36 Allpowers. 2016. Verkkoaineisto. <<http://www.allpowers.net/index.php?c=product&id=56>>. Luettu 25.9.2018.
- 37 PLV7 7W Wire Wound Precision Power 4-Terminal Axial Shunt. Verkkoaineisto. <<http://www.precisionresistor.com/PLV7-7W-Wire-Wound-Precision-Power-4-Terminal-Axial-Shunt.html>>. Luettu 26.9.2018.

Liite 1. Ominaiskäyrän mittaustulokset

I (mitattu) V(mitattu) P(laskettu)			Aurinkoinen sää 11.8.2018		
Pilvinen sää 4.8.2018					
I(mA)	U(V)	P(mW)	I(mA)	U(V)	P(mW)
0	19,93	0,00	0	19,52	0,00
10	19,59	195,90	25	19,14	478,50
20	19,51	390,20	50	18,98	949,00
30	19,45	583,50	75	18,82	1411,50
40	19,35	774,00	100	18,62	1862,00
50	19,21	960,50	125	18,51	2313,75
60	19,19	1151,40	150	18,37	2755,50
70	19,04	1332,80	175	18,21	3186,75
80	18,87	1509,60	200	18,03	3606,00
90	18,71	1683,90	225	17,86	4018,50
100	18,54	1854,00	250	17,68	4420,00
110	18,3	2013,00	275	17,46	4801,50
120	18,11	2173,20	300	17,22	5166,00
130	17,8	2314,00	325	16,91	5495,75
140	17,23	2412,20	350	16,11	5638,50
150	16,66	2499,00	375	9,85	3693,75
160	15,23	2436,80	400	8,59	3436,00
170	0,7	119,00	425	7,04	2992,00
			450	5,92	2664,00
			475	4,45	2113,75
			510	0,1246	63,55