



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

AURINKOVOIMALAN LIITTÄMINEN MIKROVERKKO- JÄRJESTELMÄÄN

Connecting a solar power plant to the microgrid system

Mikko Hevosmaa

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Mikko Hevosmaa

Aurinkovoimalan liittäminen mikroverkkojärjestelmään

2012

Kandidaatintyö.
36 sivua, 13 kuvaa, 2 taulukkoa.

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen
Tutkijatohtori Katja Hynynen

Tässä kandidaatintyössä on tavoitteena tarkastella aurinkovoiman hyödyntämistä sähköntuotannossa ja tutkimuskäytössä osana Lappeenrannan teknillisen yliopiston Green Campus järjestelmää. Työn sisältöön kuuluu mikroverkko- ja aurinkovoimalajärjestelmän tarkastelu sekä lyhyt katsaus PV-aurinkovoimalatekniikan soveltuvuuteen Suomen olosuhteissa. Tämän työn pääpaino on aurinkovoimalan liittämisen mikroverkkojärjestelmään, sekä siihen sisältyvien haasteiden ja niiden ratkaisujen käsittelyssä.

Työn aluksi esitellään PV-aurinkovoimalan toimintaperiaate ja järjestelmään kuuluvat osat. Sitä seuraa mikroverkkojärjestelmän tarkastelu yleisellä tasolla, jota seuraa käsittely aurinkovoimalan liittämisestä Green Campuksen sähköjärjestelmään.

Työn päätteeksi tultiin tulokseen, että pieni- ja keskikokoiset aurinkovoimalat soveltuvat erinomaisesti tutkimuskäyttöön sekä tavalliseen asuinrakentamisen yhteyteen. Nykypäivänä aurinkovoimalajärjestelmillä on erittäin laajat soveltamisen mahdollisuudet ja käyttöönotto on suhteellisen vaivatonta, sillä voimalan tarvitsemat komponentit tarjoavat jo itsessään suuren osan huomioitavista näkökulmista. Esimerkiksi laitteiden suojaus on pääosin turvattu jo laitestandardeissa ja laitteiden ominaisuuksia laajennetaan yhä monipuolisempiin tarkoituksiin, kuten mikroverkko- ja saarekekäyttöihin. Tällainen suunnittelu mahdollistaa helposti lähestyttävän perusteen harkita aurinkovoimaloiden käyttöönottoa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Mikko Hevosmaa

Connecting a solar power plant to the microgrid system

2012

Bachelor's Thesis.

36 pages, 13 figures, 2 tables.

Examiners: Professor Olli Pyrhönen
Postdoctoral researcher Katja Hynynen

The objective of this bachelor's thesis is to examine how solar power can be utilized in electricity production and researching as being part of Lappeenranta University of Technology Green Campus system. This thesis contains examining of microgrid and solar power systems and a short overview on the suitability of a photovoltaic solar power technology in Finland. The main focus of this thesis is reviewing the connection of a solar power plant to a microgrid system. This also includes reviewing the challenges concerning the systems and examining the solutions to the challenges.

For the beginning, operating principles of photovoltaic solar power systems and the components concerning these are briefly introduced. After that follows examining of the microgrid systems in a general level, followed by how to connect photovoltaic solar power plant into the Green Campus grid.

The final conclusion is that small and medium sized solar power systems are suitable for researching and residential construction. Nowadays solar power systems have wide range of application possibilities and deployment of these systems is fairly effortless. This is made possible through manufacturing the key components to provide these aspects. For example protection of these components is mostly implemented from the known standards and properties of these components are increasingly improving to provide the usage of microgrids and island operations. This kind of designing makes it easy to consider using solar power systems in various applications.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	5
1. Johdanto.....	6
1.1 Aurinkoenergian nykytilanne.....	6
1.2 Järjestelmän kuvaus	8
1.3 Työn tavoitteet	8
2. Aurinkoenergiajärjestelmä	10
2.1 PV–aurinkopaneelijärjestelmän toimintaperiaate	10
2.2 PV-paneelien rakenne	12
2.3 PV–aurinkopaneelijärjestelmän laitteisto	13
2.3.1 Paneelit	13
2.3.2 Aurinkoseuraajat	14
2.3.3 Invertterit	16
2.3.4 Akusto ja latausohjaimet	18
2.4 Liityntä verkkoon tai kiinteistön sähköjärjestelmään	19
2.5 Järjestelmän suojaus	21
2.5.1 Aurinkovoimalan osien suojaus.....	21
2.5.2 Verkkoon kytketyn aurinkovoimalan suojaukset.....	21
2.6 PV-järjestelmät asuinrakentamisessa ja sähköntuotannossa	22
2.7 Aurinkoenergiajärjestelmän kustannukset	23
2.8 Aurinkoenergiajärjestelmän mitoitus.....	26
3. Mikroverkkojärjestelmä	30
4. Aurinkovoimalan liittäminen LUT Green Campus järjestelmään	31
4.1 Green Campuksen mikroverkkojärjestelmästä	31
4.2 Aurinkovoimala osana Green Campuksen mikroverkkojärjestelmää	31
5. Yhteenveto	34
Lähteet.....	35

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AM	Ilman massa
DC	Tasavirta
LCOE	Tuotetun sähkön kustannus
MPPT	Maksimitehopisteen jäljitys
PV	Valosähköinen ilmiö
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
TLCC	Elinkaarikustannus
η	hyötysuhde
α	kallistuskulma
A	pinta-ala
C_n	vuosittainen investointi- ja operatiiviset kustannukset
d	korkokanta
E	sähkökentän voimakkuus
G	säteilyvoimakkuus
I	virta
k	korjauskerroin
N	pitoaika
n	vuosi
P	teho
Q_n	vuosittainen energiantuotto
T	lämpötila
U	jännite
w	nopeus

Alaindeksit

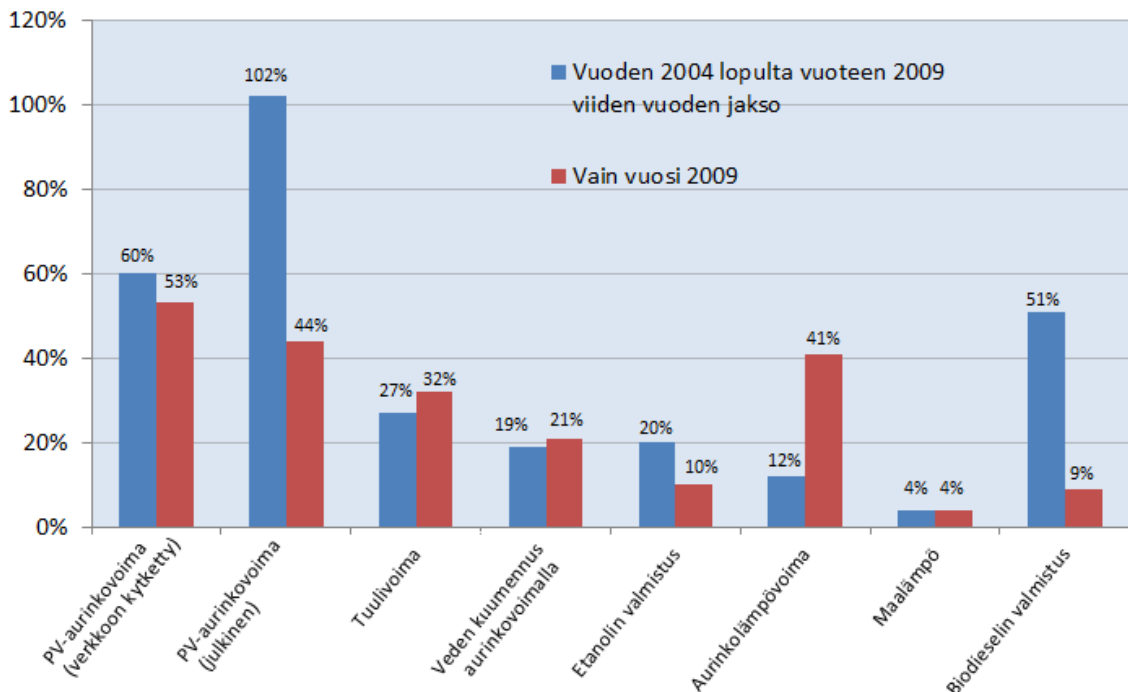
a	ympäristö
c	lähtö
e	sähkö
max	huippu
p	paneeli
s	säteily

1. JOHDANTO

1.1 Aurinkoenergian nykytilanne

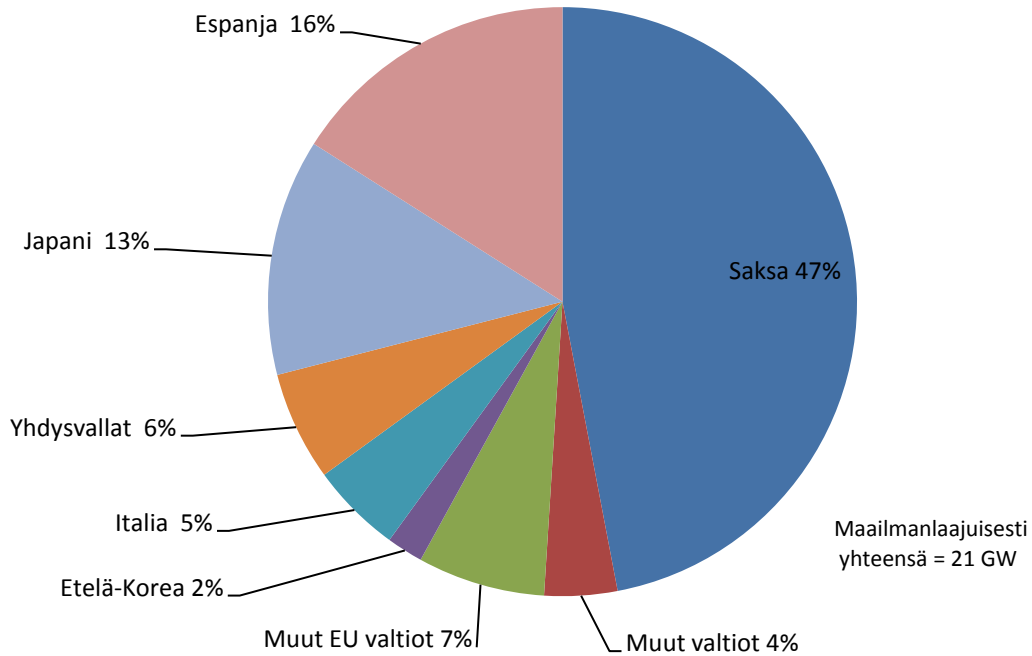
Uusiutuvan energian käyttö on korostumassa jatkuvasti ja siihen vaikuttavia syitä on laajalti. Sähkön tuottaminen alkaa käydä yhä kalliimmaksi, kun huomioidaan tiettyjen luonnonvarojen hidas, mutta väistämätön väheneminen. Ilmastonmuutokset, ja niitä koskevat rajoitteet, tekevät yhä houkuttelevammaksi siirtyä hyödyntämään luonnon itsestään tarjoamia keinoja tuottaa sähköä, kuten tuuli- ja aurinkovoima. Tarkastellaan seuraavaksi aurinkovoimalla tuotettua sähköä, toisin sanoen valosähköistä ilmiötä (PV, Photovoltaic) hyödyntävän tekniikan kautta saavutettua sähköä.

Vuosien 2004 ja 2009 välillä uusia PV-paneeleita on otettu käyttöön maailmalla arviolta 60%:n vuosikasvulla, joka vastaa vuoden 2009 käytössä olevaa PV-sähköntuotantoa arviolta 21 GW edestä. Aurinkosähkön kiinnostus maailmalla on merkittävästi suurempaa kuin muiden uusiutuvien energiamuotojen sähköntuotantotavoilla. Tämä nähdään kuvasta 1, jossa on kuvattu vuosien 2004 ja 2009 välistä keskiarvollista uusiutuvan energian sähköntuotantojen käyttöönottoa. (Renewables 2010 Global status report)



Kuva 1. Uusiutuvan energian kapasiteettien keskimääräinen vuosittainen kasvu vuoden 2004 lopulta vuoteen 2009 asti. (Renewables 2010 Global status report)

Suurin kasvu on tapahtunut Saksassa, jossa vuonna 2009 käytössä olevaa PV-sähköntuotantoa oli lähes 10 GW edestä asennettuna ja nykyiseltään arviolta 16,5 GW. Tämä nähdään kuvasta 2. (Renewables 2010 Global status report)



Kuva 2. PV-sähköntuotannon olemassa oleva kapasiteetti vuonna 2009. Kuvan valtioiden prosentuaaliset osuudet ovat verrattuna maailmanlaajuisen yhteismäärään, joka on myös mainittuna kuvan yhteydessä. (Renewables 2010 Global status report)

Suomessa aurinkosähkön käyttöönotto on ollut erittäin hidasta vielä nykypäiväänkin asti. Yksi merkittävimmistä syistä tähän löytyy riittävän tehokkaiden ohjaavien tekijöiden puutteesta, kuten esimerkiksi valtionapurahoitus asennetusta aurinkosähköntuotannosta. Maantieteellisesti Suomellakin olisi hyvät mahdollisuudet aurinkosähköntuotannon laajamittaiseen käyttöönottoon, tosin toteuttamisen investoinnit ovat suhteellisen korkeat.

Vuonna 2010 Suomessa tuotettiin aurinkovoimalla sähköä arviolta 6,9 GWh, joka kuitenkin on merkittävästi pienempi osa verrattuna esimerkiksi Saksan osuuteen, joka oli tuolloin arviolta 12 000 GWh, tai vastaavasti koko Euroopan kesken tuolloin tuotettuun PV-sähkön osuudella 22 452 GWh. (EurObserv'ER 2011)

1.2 Järjestelmän kuvaus

Yliopiston alueelle on suunniteltu sijoitettavan PV-paneeleita tuottamaan sähköä tutkimuskäyttöön sekä pienimuotoiseen kulutukseen. Paneelien tehontuotto on arviolta 20 kW. Paneeleilta saatava sähkö tulee DC:nä, eli tasasähkönä, ja voidaksemme hyödyntää tätä sähköä normaalissa kulutuksessa, järjestelmään tarvitaan inverttereitä. Lisäksi, mikäli järjestelmään halutaan lisätä akkupankki, tarvitaan myös latausohjaimia. PV-paneeleilla tarkoitetaan tässä työssä aurinkosähköä ("photovoltaic") tuottavia paneeleita.

Alustavasti aurinkopaneeleita tulee järjestelmään arviolta 72–80 kappaletta, jotka tullaan sijoittamaan campus-alueelle kolmesta viiteen eri paikkaan. Paneelit sijoitetaan pääosin yliopistorakennuksen katolle. Sijainnin valinnassa otetaan huomioon varjostukset sekä rakenteiden kestävyys. Paneelien ryhmittelyssä tulee huomioida, millainen jännite kultaakin paneeliryhmältä halutaan saada. Kun tiedetään yhdeltä paneelilta saatava jännite, voidaan mitoittaa paneelien sarjoittaminen halutun jännitetason saavuttamiseksi.

Paneelit tullaan asentamaan telineille, joiden rakenteiden tulee mahdollistaa aurinkoseuraajan käyttämisen. Paneelitelineitä on saatavilla useassa kokoluokassa, paneelien kantomäärän mukaan. Telineiden kantokyky vaihtelee suuresti, mutta yleisimmät pystyvät kantamaan 8-20 paneelia/teline. Mikäli halutaan huomioida paneelien sarjoittamiset jo telineiden hankintojen yhteydessä, voidaan telineiden kantokyky mitoittaa yksittäisten paneeliryhmien sarjoittamisen mukaan. Tehtäessä valintoja paneeleita kannattavista telineistä, tulee huomioida myös Suomen sääolosuhteet koko vuoden ajalta. Oleelliset huomiotavat asiat sääolosuhteiden osalta ovat talven mukanaan tuomat lumikuormat sekä voimakkaat tuulet koko vuoden ajalta. Kun nämä ylimääräiset kuormat ja rasitteet otetaan huomioon, voidaan joutua harkitsemaan erikoisvalmisteisia telineitä tai on löydyttävä mahdollisuus vähentää näitä rakenteille koituvia ylimääräisiä rasituksia.

1.3 Työn tavoitteet

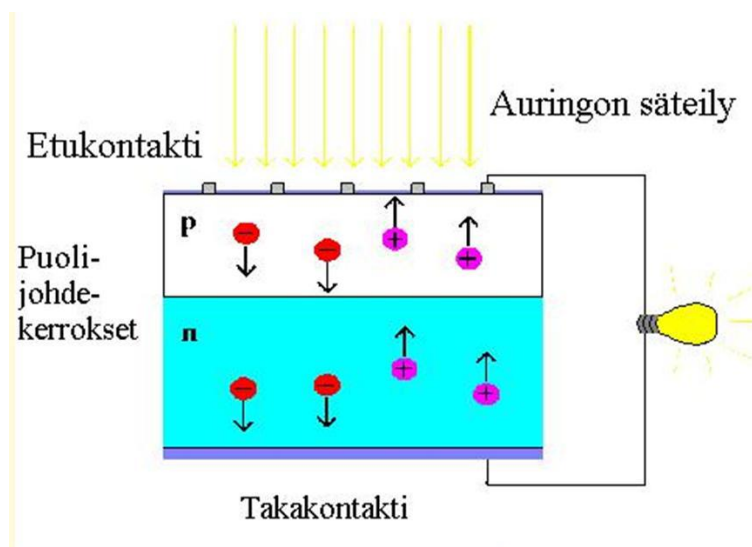
Tämän työn tarkoitus on olla suuntaa antava opas pienten ja keskitehoisten aurinkovoimaloiden käyttöönotolle, ja antaa mahdollisimman selvä kuva siitä, millaisia asioita tulee ottaa huomioon kytkettäessä aurinkovoimala paikalliseen sähköverkkoon. Samalla tulisi tuoda esille aurinkovoimalan toteuttamiseen tarvittava laitteisto.

Tässä työssä käsitellään aurinkoenergiajärjestelmien soveltuvuutta mikroverkkojärjestelmissä sekä kiinteistön omassa verkossa. Aluksi käydään läpi PV-paneelijärjestelmien toimintaperiaatteita, siihen kuuluvia osia sekä kustannusarviointia liittyen paneelijärjestelmien toteutuksiin ja laitteistoihin. Tämän jälkeen tarkastelu siitä, kuinka tällainen järjestelmä voitaisiin liittää Green Campus verkkoon eli kiinteistön käytössä olevaan sähköverkkoon. Tämän yhteydessä tarkastellaan myös mikroverkkojärjestelmiä ja PV-paneelijärjestelmien soveltuvuutta mikroverkoissa.

2. AURINKOENERGIAJÄRJESTELMÄ

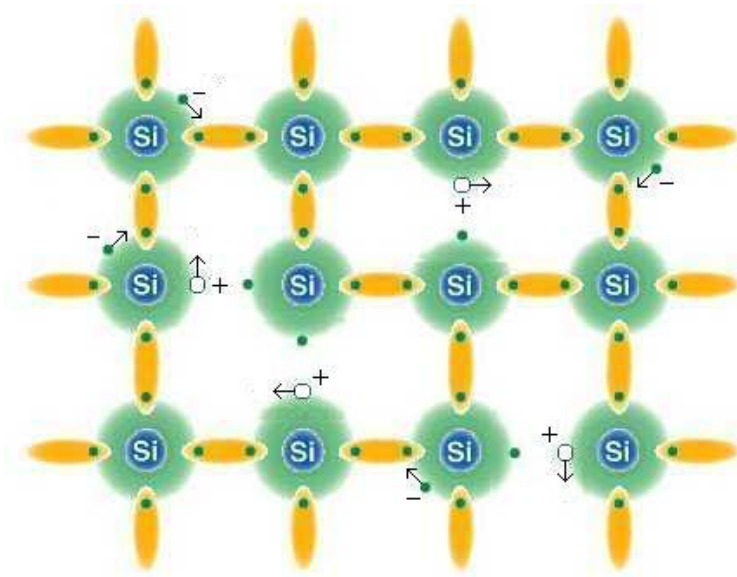
2.1 PV–aurinkopaneelijärjestelmän toimintaperiaate

Aurinkokennojen tarkoitus on muuttaa auringon tuottama valo ja tarkemmin sen säteilyn energia sähköenergiaksi. Energianmuunnoksen ensimmäisessä vaiheessa auringon säteilyn fotonit siirtävät energiansa kennon varauksenkuljettajille osuessaan kennon etukontaktiin. Näiden positiivisten ja negatiivisten varausten vastakkainen liike kennon p- ja n-materiaalien välillä muodostaa jännitteen kennon etu- ja takakontaktin välille. Kuva 3 esittää edellä kuvattua prosessia. Kytkemällä sarjaan näitä kennoja, saadaan riittävä jännite useimmille eri sovelluksille ilman erillisiä keinoja jännitteen nostamiseksi. Sähkö saadaan tasavirtana, jota voidaan jo sellaisenaan hyödyntää esimerkiksi akkujen lataamiseen. Yleisemmille kuormille tarvitaan siis vaihtosuuntausta inverttereiden avulla. (Larjola et al. 2011)



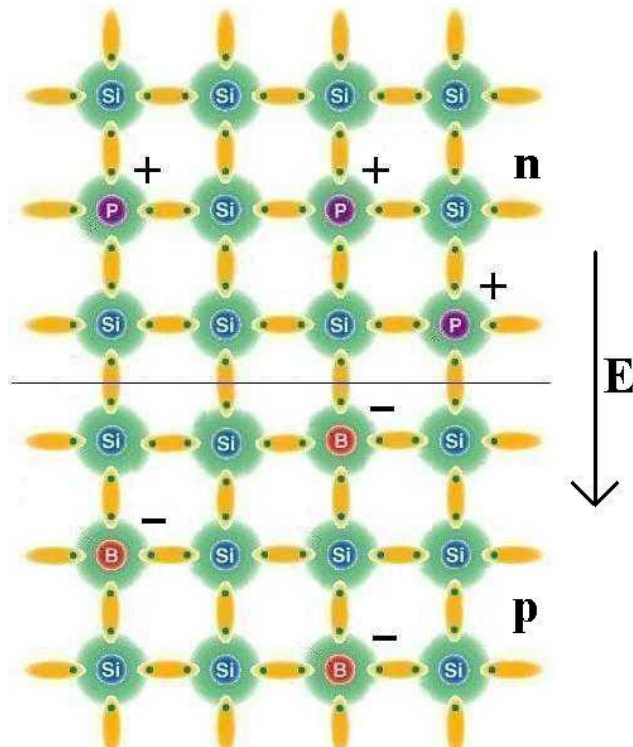
Kuva 3. Aurinkokennon toimintaperiaate (Aarnio)

Sähköä tuottavien kennojen toiminnan perustana on valosähköinen ilmiö. Pohjimmiltaan tämä tarkoittaa auringonvalon absorptiota kennojen puolijohdekerroksissa, jonka taas muodostavat tasapainoehdojen mukaisesti järjestäytyneet atomit kennomateriaalissa. Elektronien energiatiloja puolijohdekerroksissa kutsutaan valenssi- ja johtavuusvyöiksi. Elektronien ollessa lepotilassa, niiden olotilaa kuvastaa valenssivyö. Korkeamman energian omaava hilasta vapautunut elektroni siirtyy valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tällöin elektroni on saanut energiaa kennoon osuneelta fotonilta. Elektronin siirtyessä se jättää jälkeensä lähtöatomille aukon ja näin ollen kyseinen atomi on positiivisesti varautunut. Sähkö kulkeutuu kennon sisällä negatiivisten elektronien ja positiivisten aukkojen liikkumalla, kuvan 4 mukaisesti. (Aarnio)



Kuva 4. Negatiivisten elektronien ja positiivisten aukkojen keskinäinen liikkuminen hilassa. (Aarnio)

Tähän prosessiin liittyy myös oleellisesti toinen ilmiö, jota kutsutaan rekombinaatioksi. Tämä aiheutuu siitä, että vapaat elektronit täyttävät perusluonteensa puolesta erittäin nopeasti muodostuneita positiivisia aukkoja. Tämä ilmiö puolestaan heikentää valosähköisen ilmiön etuja, joten tarvitaan keinoja, joilla elektronit ja aukot voitaisiin erottaa toisistaan ennen rekombinoitumista. Tämä pystytään saavuttamaan sekoittamalla kennomateriaaliin erityyppisiä vieraita atomeja, kuten esimerkiksi fosfori- tai booriatomeja. Näillä yhdistelmillä saadaan hilaan ylimääräisiä positiivisesti ja negatiivisesti varautuneita atomeja muodostaen n-tyypin puolijohteita, joissa on ylimääräisiä elektroneja, sekä p-tyypin puolijohteita, joissa on elektronialijäämä. Kun p- ja n-tyypin puolijohteet laitetaan kosketuksiin keskenään, diffundoituvat ylimääräiset elektronit n-puolelta p-puolelle muodostaen kennostolle sisäisen sähkökentän. Tämä nähdään kuvasta 5. (Aarnio)



Kuva 5. n-tyypin puolijohde, joka on muodostettu piiatomeista (Si) ja fosfaattiatomeista (P), sekä p-tyypin puolijohde, joka on muodostettu pii- ja booriatomeista (B). (Aarnio)

Sisäinen sähkökenttä ohjaa n-puolella syntyneet aukot p-puolelle ja vastaavasti p-puolella vapautuneet elektronit n-puolelle. Näin ollen vapaat elektronit ja aukot ovat selvästi erillään toisistaan ja mahdollistaa suuremman hyödyn valosähköisestä ilmiöstä. (Aarnio)

2.2 PV-paneelien rakenne

Yleisimmin aurinkopaneeli muodostuu alumiinikehikosta, lasilevystä sekä kennoista. Kehikon tarkoitus on tukea kennon sisäisiä johtimia ja paneelin komponentteja sekä mahdollistaa luotettava kiinnitys telineeseen. Kennojen johdinkerros muodostuu yleisemmin piikidemateriaaleista sekä useista kerroksista, jotka suojaavat kennon johtimia ulkoisilta vaikutuksilta. Päälimmäinen kerros on yleisesti lasia, joka toimii omalta osaltaan suojana kennojen herkille osille. Kehittyneimmät lasit mahdollistavat lisäksi parannuksia kennon johtimien kiinnityksiin. Kyseisen lasikerroksen tulee kuitenkin olla mahdollisimman valoa läpäisevä, jotta hyötysuhde ei heikentyisi. Lasikerrosta seuraa fotoneita kaappaavia kerroksia, joiden tarkoitus on maksimoida fotoneilta hyödynnettävä energian saanti. Viimeisen kerroksen paneelista muodostaa hyvän lämpösäteilyn omaava kerros, jonka tulee kyetä poistamaan paneelin rakenteisiin kertyvää lämpöä. Kuten aluksi todettiin, paneelit muodostuvat useista sarjaan kytketyistä kennoista, joiden johtimet on yhdistetty toisiinsa kytkentä-

rasioiden välityksellä. Kytkentärsasioiden sisällä kaikki sarjaan kytketyt kennot on johdotettu yhteen käyttäen tinapinnoitettuja kuparilankoja muodostaen positiivisen ja negatiivisen elektrodin. (Fraas & Partain 2010, 222–223)

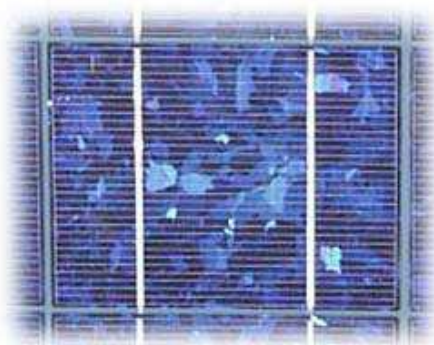
2.3 PV–aurinkopaneelijärjestelmän laitteisto

2.3.1 Paneelit

PV-paneelien kehittämisessä ei ole tapahtunut viime vuosien aikana mitään suurempia läpimurtoja yleisellä tasolla, mutta nykytekniikalla pystytään kuitenkin jo saavuttamaan suurempien ja pienempien voimaloiden rakentaminen. Paneeleita on saatavilla useilla eri teholuokilla niin teollisuuden kuin yksityisten kuluttajien käyttöön. Yleisimmiltä yksittäisiltä paneeleilta saadaan 30–280 W nimellistehoa riippuen paneelien koosta, hyötysuhteesta sekä ympäristöolosuhteista. Kennoston materiaalilla on myös merkittävä vaikutus paneelilta saatavan tehon suuruuteen. Perinteisimmät kennot on valmistettu yksikiteisestä, monikiteisestä tai amorfisesta piistä. Kuvassa 6 nähdään yksikiteinen piikkeno ja kuvassa 7 monikiteinen piikkeno.



Kuva 6. Yksikiteinen piikkeno (Savonia)



Kuva 7. Monikiteinen piikkeno. (Savonia)

Paneeleiden hyötysuhteeseen vaikuttaa pääosin niiden valmistukseen käytetty materiaali, joka määrittää paneelin kyvyn absorboida siihen kohdistuvan auringon säteilyn tuoma energiasisältö. Paneeleiden hyötysuhde vastaa sitä osuutta auringon säteilyn spektristä, minkä paneelimateriaali kykenee absorboimaan. NykYTEKNIKALLA hyötysuhteet ovat tavallisesti luokkaa 10–15% yksi- ja monikiteisillä piikenneilla. Paremmilla paneelitekniikoilla, saavutetaan lähemmäs 20% hyötysuhteita. Ohutkalvopaneeleilla hyötysuhteet ovat luokkaa 13%, esimerkkinä kupari-indiumseleniidikennot. (Larjola et al. 2011)

Paneelin kokonaishyötysuhteeseen vaikuttaa myös sähköenergian muodostaminen ja siirtäminen paneelirakenteessa, joihin vaikuttaa vahvasti paneeleiden valmistuskeinot sekä valmistuksessa käytetty kennomateriaali. Tätä käsiteltiin tarkemmin kappaleessa 2.1, jossa esiteltiin eri yhdisteiden keskinäistä sekoittamista kennomateriaalissa ja sen tuomaa hyötyä koskien valosähköistä ilmiötä. Tästä johtuen markkinoille on tullut runsaasti eri yhdistelmiä kennomateriaaleista, koskien erityisesti ohutkalvo- ja monikidepaneeleita.

Teoreettinen arvo piikidekennojen hyötysuhteelle on 31%, mutta kun huomioidaan liitosten aiheuttamat häviöt ja heijastukset, laskee hyötysuhde merkittävästi. Tummemmat sävyt heijastavat valoa vähemmän ja näin ollen paneeleiden valmistuksessa suositaankin tummentavia pinnoitteita. Tällöin saadaan parannettua paneeleiden hyötysuhdetta. (Savonia)

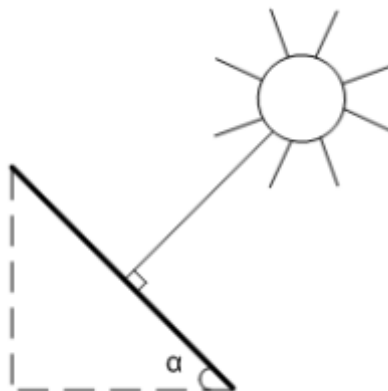
Yleisimmin paneelit on valmistettu yksikiteisestä piistä (crystalline silicon, c-Si) sekä monikiteisestä piistä (multicrystalline silicon, mc-Si). Paljon kehitystä on tapahtunut ohutkalvopaneeleiden valmistuksessa ja näiden valmistuksessa käytetään laajalti erilaisia yhdistelmiä, kuten kupari-indiumgalliumsulfidi (CIGS), kupari-indiumgalliumselenidi (CIGSe) sekä kadmiumtelluridi (CdTe). (Aarnio)

2.3.2 Aurinkoseuraajat

Nykyisin PV-tekniikan soveltamisessa hyödynnetään paneeleiden telineiden yhteydessä aurinkoseuraajajärjestelmiä, joiden tarkoitus on lisätä paneeleilta saatavaa tehoa. Tämä tapahtuu siten, että aurinkoseuraajat seuraavat auringon aseman muutosta paneeleihin nähden ja kohdistavat paneelit niin, että auringon säteet osuvan paneeleihin mahdollisimman kohtisuoraan. Tästä seuraavan tehonlisäyksen voidaan arvioida olevan vuotuisessa tehontuotannossa jopa 45% riippuen muista olosuhteista, kuten sääolosuhteista sekä paneeleiden sijainnin varjostuksesta. (Savonia)

Aurinkoseuraajalaitteistot voidaan jakaa yleisemmin kahden ja yhden akselin ohjaukseen. Kahden akselin ohjauksella saadaan suurin hyötysuhde, koska tällöin paneelit saadaan kohdistettua vaaka- ja pystysuoralla akselilla parhaimpaan mahdolliseen kulmaan auringon säteisiin nähden, kun taas yhden akselin ohjauksella paneeleita pystytään ohjaamaan pelkästään vaakasuoralla akselilla. Jo yhden akselin ohjauksella voidaan saavuttaa merkittävät tehonlisäykset, sillä paneelit voidaan sijoittaa telineisiin sopivaan kulmaan pystysuunnassa, jolloin tarvitaan pelkästään vaakasuoran liikkeen seuranta.

Kallistus- ja suuntakulmalla on merkittävä vaikutus paneeleilta saatavaan tehoon. Kallistuskulma on paneelin ja vaakatason välinen kulma. Paneelilta saavutetaan suurin teho, kun auringon säteet osuvat paneelin pintaan kohtisuoraan. Kallistuskulma α on havainnollistettu kuvassa 8. Suuntakulma kuvaa paneelin poikittaissuuntaista asettelua auringon vuorokautiseen liikerataan horisonttiin nähden. Suuntakulma valitaan sen mukaan mistä aurinko paistaa keskipäivällä, tosin käyttämällä aurinkoseuraajaa välttämään suuntakulman tarkemmalta valinnalta. Suomessa suuntakulma tulee valita etelään päin. Auringon säteily voidaan jakaa suoraan säteilyyn sekä hajasäteilyyn. Kallistuskulman tuoma merkitys koskee pääosin suoraa säteilyä, sillä hajasäteilyn kohdistuminen paneeliin tapahtuu useilta suunnilta ja on näin ollen haastavaa huomioida.



Kuva 8. Aurinkopaneelin kallistuskulma α .

Aurinkopaneelin kohdistamisessa tulee huomioida auringon korkeuden vaihtelut horisonttiin nähden vuorokauden aikana. Tämän huomiointi on merkittävä tekijä paneelilta saatavan tehon optimoinnissa, ja koska kesällä ja talvella nämä korkeuserot poikkeavat toisistaan huomattavasti, on käytettävä eri kallistuskulmia, mikäli tehonsaanti paneeleilta halutaan optimoida koko vuoden ajalta. Kallistus- ja suuntakulma voidaan jättää huomiotta,

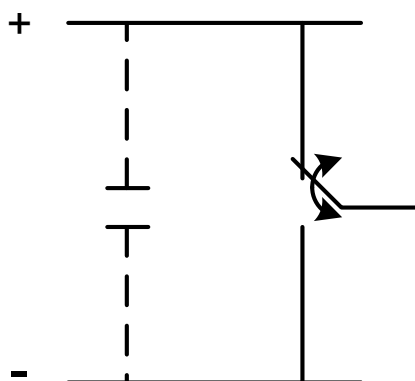
mikäli käytössä on kahden akselin ohjauksella toimiva aurinkoseuraaja, joka esiteltiin aikaisemmin.

Kesän ajalta n. 30° kallistuskulma on optimaalisin, kun taas talvella suurimmat tehot saavutetaan $\alpha = 75\text{--}90^\circ$ kulmalla. Mikäli paneelit asetetaan koko vuoden ajaksi yhteen kulmaan, optimaalisin kulma tehon kannalta on n. 45°. (Genergia.fi 2012)

2.3.3 Invertterit

Aurinkopaneeleilta saadaan sähkö tasavirtana, joten sen sähköä voidaan hyödyntää ainoastaan tasavirtasovelluksissa tai akkujen lataamiseen. Mikäli halutaan hyödyntää vaihtovirtasovelluksissa, on tasavirta muunnettava vaihtovirraksi. Tämä tapahtuu invertterillä, eli vaihtosuuntaajalla. Tässä työssä tarkastelun kohteena oleva paneelijärjestelmä tulee tarvitsemaan invertterilaitteiston, jotta paneelien käyttötarkoitusta saadaan laajennettua yleiseen sähkökuorman käyttöön, kuten toimistotilojen sähkölaitteiden käyttöön sekä laajemmin tutkimuskäyttöön.

Invertterin toimintaperiaate on seuraava: Vaihtosähköä muodostetaan leikkaamalla sopivia osia sitä syötettävästä tasajännitteestä. Tämä toteutetaan käyttämällä niin kutsuttua vaihtokytkintä, joka kytkee vaiheen lähdön tasajännitelähteen plus- tai miinusnapaan. Tämä toteutustapa nähdään kuvasta 9. (Partanen, Jarmo)



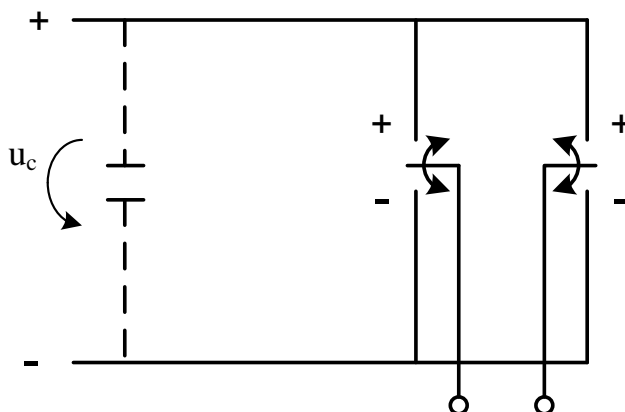
Kuva 9. Invertterin 2-tasaisen vaiheen kytkinmalli. (Partanen, Jarmo)

Tällaista kytkentää kutsutaan 2-tasaisen vaiheen kytkinmalliksi. Vaihtokytkintä kääntämällä edestakaisin napojen välillä siten, että kytkin on ala- ja yläasennossa yhtä kauan ajan, tällöin vaiheen lähtö on keskimäärin tasajännitelähteen keskipisteen potentiaalissa. Vaihto-

kytkintä käytetään useiden kHz:en suuruisilla taajuuksilla, ja tätä kutsutaan kytkentätaajuudeksi. Tällöin pulssisuhde on 1:1. Pulssisuhdetta vaihtelemalla voidaan vaikuttaa lähtöjännitteen potentiaaliin. (Partanen, Jarmo)

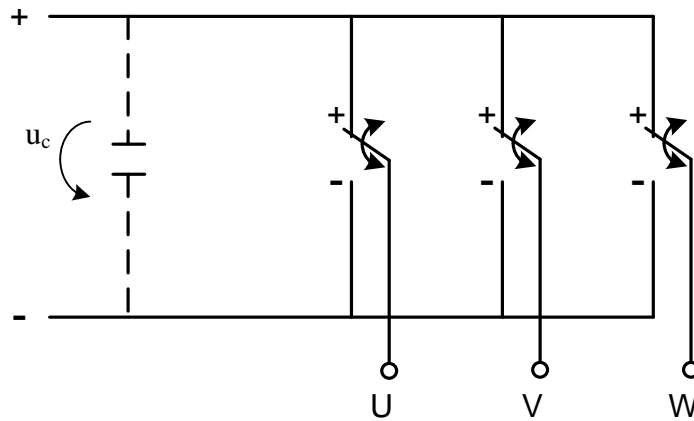
Pulssisuhteella tarkoitetaan lähtötasojaännitteiden $+u_c$ ja $-u_c$ puolijaksojen pituuksien suhdetta jaksonaikaan.

Hilalta sammutettavien tehopuolijohteiden avulla voidaan toteuttaa myös 3-tasoisia inverttereitä, joissa on 2-tasoiseen verrattuna mahdollisuus kytkeä lähtö myös tasajännitelähteen keskipisteeseen. Tarkastellaan kuitenkin 2-tasoisia inverttereitä, jolloin kytkinsilta muodostuu kahdesta vaihtokytkimestä, joilla voidaan toteuttaa 4 eri kytkinasentokombinaatiota, näin ollen (+,-), (-,+), (+,+) sekä (-,-). Näistä yhdistelmistä kaksi viimeistä kuvaa lähtöjännitetasoa 0, kun taas kaksi ensimmäistä kuvaa lähtöjännitetason positiivista $+u_c$ ja negatiivista $-u_c$ arvoa. Tämä kytkentämalli nähdään kuvasta 10. Näiden kytkentöjen yhteydessä käytetään modulaatiota, joka määrittää miten ja missä suhteessa näitä kolmea tasoa, $+u_c$, $-u_c$ sekä 0, käytetään. Modulointia käytetään, jotta lähtöjännite saataisiin halutun muotoiseksi, esimerkiksi sinimuotoiseksi. (Partanen, Jarmo)



Kuva 10. 2-tasoisin yksivaihesillan kytkinmalli. Kuvassa u_c on lähtöjännite. (Partanen, Jarmo)

Lisäämällä tähän vielä yhden vaiheen, saadaan aikaiseksi kytkentä, jonka avulla voidaan saavuttaa symmetrinen kolmivaihejännite. Tämä kytkentä mahdollistaa vapaamman lähtötaajuuden ja amplitudin muuntelemisen. Kolmivaihesillan kytkentä mahdollistaa 8 eri kytkentäkombinaatiota, joka on säädön kannalta huomattavasti monipuolisempaa kuin esimerkiksi 2-tasoisella yksivaihesillan kytkentämallilla. Kolmivaihesillan kytkentämalli nähdään kuvasta 11. (Partanen, Jarmo)



Kuva 11. 2-tasoisien kolmivaihesillan kytkinmalli. Kuvassa U, V ja W kuvaavat vaiheita. (Partanen, Jarmo)

Modulointi toteutetaan pääosin pulssinleveysmoduloinnilla (PWM, Pulse Width Modulation). PWM toteutetaan siten, että lähtöjännitteen jakso jaetaan vakiosuuruisiin kulmaosuuksiin, joiden kestoaika on yleensä 1 ms. Suorittamalla useita kytkinkombinaatioita kulmaosuuksien aikana, saadaan lähtöjännite sinimuotoiseksi, joka on useimmiten se, mitä tavoitellaan jännitteen muodoksi. (Partanen, Jarmo)

2.3.4 Akusto ja latausohjaimet

Latausohjainten tarkoitus on huolehtia akkujen lataamisesta sekä suojata niitä ylikuormituksilta ja syväpurkauksilta. Latausohjain huolehtii, että akkuja ladataan sopivalla virralla ja estää mahdolliset ylijännitteet. Akkujen suojaaminen syväpurkautumiselta on erittäin suositeltavaa, sillä akkujen elinikä lyhenee jännitetason laskiessa liian alas. Latausohjaimia löytyy useita erityyppisiä eri sovelluksiin. Akkujen lataamisen kannalta latausohjaimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat pulssinleveysmodulaatio sekä maksimitehopisteen jäljitys (MPPT, Maximum Power Point Tracking). Latausohjaimia löytyy erillisinä sovelluksina sekä invertterin ja latausohjaimen yhdistelminä.

Pulssinleveysmodulaatio säättää latausjännitettä muuntamalla jännitteen pulssisuhdetta, kuten aikaisemmin asiaa tarkasteltiin. Tällöin latausohjaimen läpi ohjataan virtaa akun lataustilanteen mukaisesti ja kun akku on lähes täydessä varauksessa, latausta jatketaan pulssittaisesti. Tämä mahdollistaa perusteellisemmän akkujen latautumisen sekä parantaa akkujen kuntoa, mikäli ne ovat päässeet sulfidoitumaan. (Eurosolar, aurinkoenergiaopas 2012)

Sulfidoitumista tapahtuu ikääntyneille akuille, erityisesti lataamattomille ja käyttämättömille, ja lataamalla niitä pulssittaisesti, saadaan sulfidoitumista poistettua.

Maksimitehopisteen jäljitys on täysin elektroninen ominaisuus, joka mahdollistaa PV-sovelluksilta saadun tehon maksimoinnin. Tämän ominaisuuden tarkoitus on laskea se jännitteen arvo, joka tuottaa suurimman mahdollisen tehon käytössä olevalta paneelilta. Latausohjaimen kannalta tämä ominaisuus mahdollistaa akkujen lataamisen tällä suuremmalla jännitteen arvolla. Ilman maksimitehopisteen jäljitystä, akkujen lataaminen tapahtuisi akkujen määräämällä jännitteellä. Useimmiten se on alle paneelien nimellisjännitteen, mikä johtaa pienempään paneelilta saatavaan tehoon. (Blue Sky Energy Inc. 2012)

2.4 Liityntä verkkoon tai kiinteistön sähköjärjestelmään

Suomessa ei vielä ole yleisiä määräyksiä pientuotannon lisäämisessä jakeluverkkoon tai sen yhteyteen, mutta suuntaa antavia ohjeistuksia saa Energiateollisuus ry:n suosittelemasta *sähköntuotannon liittymisehdot TLE 11*:sta. Kyseiset ehdot käsittävät muun muassa liittymissopimuksen laatimisen, liittymismaksut, liittymän ylläpidon, verkkoon liittämisen, liittymän toimintavarmuuden sekä käytön ja kunnossapidon suosituksia ja määräyksiä. TLE 11 suositukset koskevat pääasiassa liittyjän puolella jakeluverkon kanssa rinnan kytkettäviä kolmannen osapuolen sähköntuotantolaitteita, kun sähköä siirretään osin tai kokonaan jakeluverkkoon. Näitä kolmannen osapuolen sähköntuotantolaitteita ovat muun muassa aurinko- ja tuulivoimalat.

Tarkastellaan seuraavaksi pääkohtia TLE 11 suosituksista ja kuinka näitä suosituksia voitaisiin soveltaa aurinkovoimalan käyttöönoton suhteen. Kytkettäessä sähköverkon rinnalle kolmannen osapuolen sähköntuotantoa, tulee sen yhteyteen asentaa mittauslaitteisto, jolla todennetaan oman tuotannon kulutus. Siirrettäessä sähköä verkkoon päin, voidaan huomioida tästä muodostuva sähkönmyynti. Näistä asioista sovitaan tapauskohtaisesti verkonhaltijoiden kanssa. Jotkin verkonhaltijat ovat määritelleet mittausvastuun siten, että pienten, nimellisteholtaan alle 1 MVA, voimaloiden oman tuotannon ja kulutuksen mittauksesta vastaa voimalan liittäjä eli asiakas. Suurempitehoisten voimaloiden oman kulutuksen mittaamisen vastuu on verkonhaltijalla.

Liitettäessä verkkoon esimerkiksi aurinkovoimala, tulee sen liittämistä maksaa liittymäkohtainen liittymismaksu, joka perustuu jakeluverkon haltijan määrittämiin liittymismaksuperiaatteisiin. Voimassa olevan liittymissopimuksen mukaan jakeluverkon haltija liittää voimalaitoksen verkkoonsa, mikäli liittymismaksut on hoidettu, laitteiston yksilölliset tekniset vaatimukset täytettynä sekä todennettu, ettei kytkennästä aiheudu verkolle vaaraa tai häiriöitä. Voimalaitoksen valmistumisvaiheessa tulisi antaa selvitys verkon haltijalle, liitteinä koestus- ja käyttöönottotarkastuspöytäkirjat. Varsinainen voimalaitoksen käyttöönotto ja liittyminen verkkoon tapahtuu jakeluverkon haltijan luvalla. (Energiateollisuus ry, TLE 11)

Liittymän, jossa on mukana kolmannen osapuolen sähköntuotantolaitteistoa, sen toimintavarmuuden, käytön ja kunnossapidon vastuut koskevat molempia sopijapuolia. Liittymän sähkölaitteistojen tulee olla sähköturvallisuuslain ja sen nojalla annettujen säännösten ja määräysten edellyttämässä kunnossa. Liittyjä on lisäksi velvollinen noudattamaan muita lainsäädännössä tai viranomaismääräyksissä ja liittymissopimuksessa mahdollisesti sähköntuotantolaitteistolle tai sähkölaitteistolle sekä niiden rakenteelle, rakentamiselle ja käytölle asetettuja vaatimuksia ja ohjeita. Viat tai häiriöt, jotka kuuluvat selvästi liittyjälle tai jakeluverkon haltijalle, tulee vastuualueen asianomaisen korjattaviksi. Mikäli toiselle osapuolelle on epäselvää kyseisen vian tai häiriön korjausvastuu, tulee tämän osapuolen selvästi ilmoittaa toiselle käsityksensä vastuutahosta. Liitettävän voimalaitoksen sähkölaitteistot tulee sijoittaa kiinteistössä siten, että jakeluverkon haltija pääsee niiden luo tarvittaessa. (Energiateollisuus ry, TLE 11)

Aurinkovoimaloiden käyttöönotto Suomessa on varsin vähäistä nykyiseltään ja tästä johtuen määräykset koskien aurinkovoimaloiden liittämistä sähköverkkoon tulee pääosin Euroopan yhteisistä säädöksistä sekä Energiateollisuus ry:n kokoamista liittymisehdoista, sillä Suomessa toimivilla sähköverkkoyhtiöillä ei ole omia määräyksiä näihin liittyen.

Tässä työssä tarkasteltava aurinkovoimala tullaan liittämään yleiseen sähköverkkoon, jolloin paikallinen sähköyhtiö tulee huomioida. Lappeenrannan Energia Oy vastaa kyseessä olevasta sähköverkosta ja heidän ohjeistukset aurinkovoimalan verkkoon liittämistä pohjautuvat Energiateollisuus ry:n määrittelemien ohjeistuksien, kuten TLE 11, soveltamiseen. (Taipale, Arto)

2.5 Järjestelmän suojaus

Aurinkovoimalat kuuluvat hajautettuun energiantuotantoon ja niiden käyttöönotto vaatii tiettyjä säädösten mukaisia määräyksiä, erityisesti koskien niiden suojausta. Lisäksi mikäli tällainen voimala kytketään kunnalliseen sähköverkkoon, tulee huomioitavaksi lisää erillisiä määräyksiä. Aurinkovoimalan suojaaminen on erittäin tärkeää, niin paneeleiden toiminnan ja kestävyuden kannalta kuin yleisen sähköturvallisuuden vuoksi.

Aurinkovoimaloiden asennusta ja suojausmenetelmiä käsitellään standardissa SFS 6000-7-712, Aurinkosähköiset tehonsyöttöjärjestelmät.

2.5.1 Aurinkovoimalan osien suojaus

Aurinkovoimala käsittää useita herkkiä ja mahdollisesti arvokkaita osia, erityisesti suuremmilla voimaloilla. Tällöin tulee voida huolehtia näiden osien kestävydestä niin käytön aikana kuin sammutettuna. Mahdollisia riskejä laitteiston osien kestävyydellä on esimerkiksi ulkoiset ilmastolliset tekijät, kuten vesi ja ukkosmyrskyt, sekä sähköiset vaarat, kuten ylivirrat ja –jännitteet.

Pääosin aurinkovoimalan tehoelektronikka tullaan sijoittamaan sisätiloihin, jolloin vältetään kosteuden aiheuttamilta laitevicioilta. Ukkosmyrskyt tulee silti ottaa huomioon, sillä korkeat jännitteet saattavat johtumalla voimalan laitteistoon aiheuttaa suuren riskin laitteiston toimivuudelle.

Voimalan käytönaikaisia riskejä laitteiston kestävyydelle on esimerkiksi akkujen lataaminen tai käyttäminen väärällä tavalla. Useimmiten latausohjainlaitteisto pystyy takaamaan riittävän suojan akuille sekä huolehtimaan niiden lataamisesta ja purkamisesta optimaalisella tavalla. Invertterit ovat myös tarkkoja niille syötettävän virran ja jännitteen suuruudesta, joten ylivirta- ja ylijännitesuojaus tulee olla niille käytönmukainen.

2.5.2 Verkkoon kytketyn aurinkovoimalan suojaukset

Kytettäessä hajautettua sähköntuotantoa kunnalliseen verkkoon, tulee huomioida sähköturvallisuuden näkökulmat sekä paneeleiden toiminnan, että sähköverkon osalta. Suojaus täytyy toteuttaa niin, että aurinkovoimalan laitteet voidaan suojata verkon suunnalta tulevilta vioilta eikä verkon suuntaan aiheudu paneeleilta häiriöitä tai vikoja. Tämän lisäksi on

huomioitava aurinkovoimalan käyttämisen ja huoltamisen ehdoton turvallisuus kaikissa mahdollisissa vikatilanteissa.

Sähköturvallisuusstandardin SFS6002 mukaan sähköntuotantolaitos tulee olla erotettavissa verkosta ja erotuslaitteessa tulee olla näkyvä ilmaväli ja erottimen käyttömekanismi tulee olla lukittavissa. Tällöin tulee käyttää sähköntuotantolaitoksen yhteydessä olevaa erotinta, mekaanista asennonosoitusta tai voimalan sulakkeiden tulee olla irrotettavissa pääkeskuksessa. (Energiateollisuus ry, YA9:09)

Käsiteltäessä hajautettua sähköntuotantoa, tulee suojauksissa huomioida tilanne, jossa menetetään yhteys paikalliseen sähköverkkoon. Tämän tilanteen yhteydessä on riski, että hajautettu tuotanto, tässä tapauksessa aurinkovoimala, ei tätä pääverkon yhteyden menettämistä huomaa ja jatkaa omaa sähkön syöttämistä verkkoon. Tästä johtuen verkkoon saattaa muodostua jännitteellisiä osia, joiden saatetaan huollon yhteydessä olettaa olevan jännitteettömiä. Tämä aiheuttaa merkittävän vaaratekijän sähköturvallisuuteen huollon yhteydessä. Täytyy siis löytää ratkaisu, jolla aurinkovoimala saataisiin luotettavasti ja riittävän nopeasti kytkettyä irti verkosta, mikäli verkko tai verkon osa tulee äkillisesti jännitteettömäksi.

Edellä mainittuun tilanteeseen on määritelty lyhin suojausten toiminta-aikavaatimus, joka on 150 ms. Tämä on määritelty standardissa EN 50438. (Energiateollisuus ry, YA9:09)

Taustasähköverkon katoamis-ongelman suojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi suojareleiden välisellä keskustelulla sekä erityisillä tarkoituksenmukaisilla releillä, jotka huolehtivat voimalan irrottamisesta verkosta vikatilanteessa. Johtuen aurinkovoimalan laitteistoista, on mahdollista, että verkkoonliitälaitteisto tarvitsee taustaverkon jännitteen tahdistuakseen syöttämään vaihtosähköä. Tällöin voimala ei välttämättä kykene toimimaan omatoimisesti saarekekäytössä ja erillistä suojausta tämän varalle ei tarvita. Aurinkovoimala tulee kuitenkin testata taustaverkon katoamisen varalta. (Energiateollisuus ry, YA9:09), (Adine)

2.6 PV-järjestelmät asuinrakentamisessa ja sähköntuotannossa

Aurinkopaneelit sähköntuotannossa ovat nykYTEKNIKALLA varsin varteenotettava ratkaisu useisiin eri käyttökohteisiin. Pienemmät 50–200 W paneelit soveltuvat erinomaisesti esimerkiksi matkustuskäyttöön veneisiin ja asuntoautoihin tai kesämökeille, joissa sähkön

käyttö on pientä. Paneelit yhteiskäytössä akkujen kanssa pystyvät mahdollistamaan riittävän sähkökäytön useille tunneille, aurinkoisina päivinä jopa koko vuorokaudelle.

Ryhmittämällä useita paneeleita saadaan helposti aikaiseksi pienimuotoisia voimaloita, joilla voidaan sähköistää jopa isompia kiinteistöjäkin, mutta huomioitaessa aurinkosähköntuotannon suuri riippuvuus sääolosuhteista, tällaiset sähköjärjestelmät eivät riitä yksittäiseksi sähköntuotannoksi. Vaikka tällainen sähkön lisätuotanto tuotaisiinkin tavallisen verkkosähkön rinnalle, voidaan tällaisilla ratkaisuilla saavuttaa suuria säästöjä sähkön hankinnan suhteen. Varsinkin kun PV-järjestelmät yleistyvät ja tuotantotekniikoiden kehittyminen tuo niiden hintoja alaspäin.

Passiivirakentaminen tuo myös omat mahdollisuudet aurinkoenergian hyödyntämiselle sähköntuotannon ohella. Aurinkopaneeleilla voidaan jopa korvata kattorakennusmateriaalia, jolloin säästöä voidaan saavuttaa jo rakennuskustannuksissa. (Larjola et al. 2011)

Tämän kandidaatintyön tarkastelun kohteena olevan aurinkovoimalan teho on 20 kW, jota voidaan pitää riittävänä esimerkiksi muutamien toimistotilojen koko sähkökulutuksen kattamiseen ympäri vuorokauden, mikäli oletetaan esimerkki saarekekäytöksi akkujen tuella.

2.7 Aurinkoenergiajärjestelmän kustannukset

Käsitellään seuraavaksi aurinkovoimalan kustannuksia yleisellä tasolla. Aurinkovoimalan kustannukset muodostuvat pääosin sen investointi kustannuksista. Voimalan käytön aikaiset operatiiviset kustannukset määräytyvät voimalan laitteiston laadusta, niiden käyttöta-voista sekä käyttöympäristöstä.

Aurinkovoimalan kustannustehokkuutta voidaan arvioida käyttämällä esimerkiksi LCOE-menetelmää ("Levelized Cost of Electricity"). Menetelmän avulla voidaan myös vertailla eri sähköntuotantomenetelmien kustannustehokkuuksia keskenään. Tällöin aurinkovoimalla tuotettua sähköä voidaan luontevasti verrata perinteisempiin sähköntuotantoihin. LCOE-menetelmä kuvaa sähköteho- ja sitä vastaavan kustannuksen suhdetta. Tuotetun sähköteho ilmoitetaan kilowattitunneissa. LCOE-menetelmä huomioi voimalan investointikustannukset, operatiiviset kustannukset, käyttöiän sekä voimalan sijainnin vaikutuksen tuotettuun sähkötehoon. Käytetyt teho- ja kustannusmääreet on ilmoitettu nykyarvossa, jolloin on huomioitu myös diskonttaustekijä. (European Photovoltaic Industry Association)

LCOE saadaan laskettua, kun tunnetaan laitteiston elinkaarikustannukset, vuosittainen energiantuotto paneeleilta sekä laitteiston pitoaika, jolloin

$$LCOE = \frac{TLCC}{\sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+d)^n}} \quad (2.1)$$

missä TLCC on laitteiston koko elinkaarikustannus nykyarvossa, Q_n vuosittainen energiantuotto, d korkokanta, N laitteiston pitoaika ja n tarkasteltavan vuoden järjestysluku. (Fraas & Partain 2010, s. 465)

TLCC, eli laitteiston koko elinkaari kustannus, on

$$TLCC = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+d)^n} \quad (2.2)$$

missä C_n on vuosittaiset investointi- ja operatiiviset kustannukset. (Fraas & Partain 2010, s. 465)

Yhtälössä (2.2) Operatiiviset kustannukset sekä tuotettusähkö tulee laskea nykyarvossa, jotta sillä saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia tarkasteluhetkellä.

Seuraavaksi esimerkkilasku tässä työssä tarkasteltavalle aurinkovoimalan kustannustehokkuudelle käyttäen LCOE-menetelmää. Laskennan suhteen tehdään seuraavat oletukset: kustannuksia muodostuu ainoastaan järjestelmän alkuinvestoinnista ja vuosittainen energiantuotto on jokaisella tarkasteluvuotena samansuuruinen. Lisäksi vuosittaiset huoltokustannukset sekä järjestelmän komponenttien suorituskyvyn vuosittainen heikkeneminen jätetään huomiotta. Laskennassa käytetään järjestelmän pitoaikana $N = 20$ vuotta ja diskonttauskertoimena $d = 6\%$ ja investointikustannusten arviona $C_n = 60\,000$ €.

Vuosittaisen energiantuoton arviointi on haastavaa ilman mittaustietoja kyseiseltä järjestelmältä. Tehdään seuraavaksi pari yksinkertaistusta, jotta voidaan laskea suuntaa antava arvio vuosittaiseksi energiantuotoksi Q_n . Arvioidaan yhden paneelin hyötysuhteeksi $\eta = 0,146$, jonka laskentaa tarkastellaan kappaleessa 2.8. Säteilymäärät kuukausittain saadaan Ilmatieteen laitoksen mittaustutkimuksesta Vantaan säähavaintoasemalta (Ilma-

tieteen laitos, energialaskenta). Tulosten perusteella on tehty yksinkertaistuksia, kuten huomioidaan vain ne tunnit jokaiselta kuukaudelta, jolloin säteily teho on suurempaa kuin $G_s = 100 \text{ W/m}^2$ (Ilmatieteen laitos, energialaskenta). Käytetyt mittaustulokset ovat mitattu Vantaan säähavaintoasemalta.

Kyseiset säteilymäärät kuukausittain nähdään taulukosta 1. Käytetään paneelin ominaisuuksina taulukon 2 arvoja ja paneelien lukumääränä 70 kappaletta. Lisäksi oletetaan, että kaikki käytössä olevat paneelit ovat yhtäläisissä olosuhteissa.

Taulukko 1. Säteilytehot kuukausittain.

Kuukaudet	Säteilyteho [Wh/m^2]
Helmikuu	22518,3
Maaliskuu	75884,2
Huhtikuu	121121,2
Toukokuu	209159,7
Kesäkuu	168218
Heinäkuu	228827
Elokuu	195255
Syyskuu	98344,4
Lokakuu	42079,1
Yhteensä	1161407

Taulukon 1 säteilymäärien perusteella vuosittaiseksi säteilytehoksi saadaan tekemillämme oletuksilla

$$Q_n = P_{s,tot} \cdot A_{p,tot} \cdot \eta = 1161407 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \cdot 70 \cdot (1,956\text{m} \cdot 0,992\text{m}) \cdot 0,146 = 23031162 \text{Wh}$$

missä $P_{s,tot}$ on säteilyteho koko vuodelta, $A_{p,tot}$ paneelien yhteispinta-ala ja η paneelien hyötysuhde.

Näin ollen vuosittaiseksi energiantuoton arvioksi saadaan likimain 23 MWh.

Kustannustehokkuudeksi järjestelmällemme saadaan esitettyjen oletusten pohjalta yhtälöllä (2.1) laskettua 0,30 €/kWh. Todellisuudessa LCOE-arvo tulisi olla suurempi, johtuen voimalan sijoituksesta sekä toteutuneesta tehontuotannosta. Lisäksi järjestelmän kompo-

nenttien ikääntyminen näkyy suurempana LCOE-arvona. Huomioiden mahdolliset huoltokustannukset ja laitteiston ikääntyminen, saavutetaan lähemmäs 0,35 €/kWh käyttäen lähtöarvoja.

Aurinkoseuraajilla on huomattava merkitys paneelien tehontuoton kannalta ja näin ollen myös taloudellisesti. Kuten kappaleessa 2.3.2 käsiteltiin, tehollisuus aurinkoseuraajalla voi olla jopa 45% verrattuna paikallaan olevaan paneeliin. Tarkastellaan seuraavaksi tilannetta ilman aurinkoseuraajaa sillä oletuksella, että energiantuotto on tällöin 45% pienempi. Laskettaessa LCOE-arvo huomioiden voimalan mahdolliset huollot, komponenttien ikääntymiset sekä ilman aurinkoseuraajaa, saadaan kustannustehokkuudeksi arviolta 0,55 €/kWh. Kun tätä arvoa verrataan aikaisempiin, voidaan todeta aurinkoseuraajan parantavan aurinkovoimalan kustannustehokkuutta näillä arvioilla vähintään 36%.

Tarkasteltuihin kustannustehokkuuslaskelmiin aiheuttaa epätarkkuutta alkuinvestoinnin ja mahdollisten operatiivisten kustannusten arviointi. Lisäksi tulosten tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi vuosittaisen energiantuoton arviointi, johon vaikuttaa oleellisesti tarkasteltavien paneelien sijoitus ja suorituskyky. Tarkimmat energiantuoton arvioinnit tulisi tehdä jälkepäin toteutuneiden mittaustulosten perusteella.

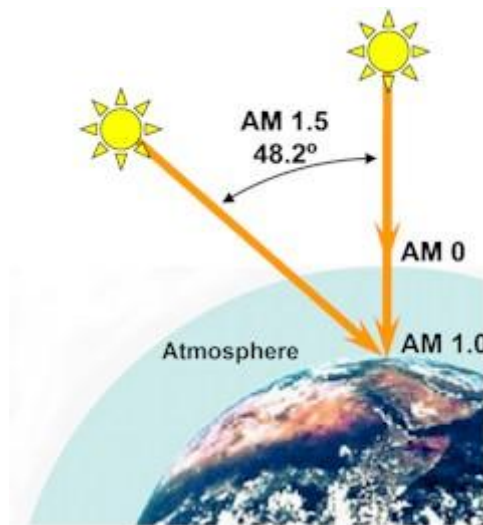
2.8 Aurinkoenergiajärjestelmän mitoitus

Aurinkoenergia järjestelmän mitoitukseen kuuluu tarvittavan akkukapasiteetin, paneelilta saatavan tehon ja muiden sähkötekniisten ominaisuuksien arviointi. Aurinkovoimalan käytön mukainen mitoitus vaatii tarkat selvitykset järjestelmästä, johonka voimala ollaan liittämässä. Aurinkovoimalan mitoitus käsittää niin liitännälliset kuin suorituskyvylliset mitoitukset. Seuraavaksi tarkastellaan paneelien suorituskyvyn määrittelemistä.

PV-paneelien hyötysuhteet on usein ilmoitettu vakiotestausolosuhteissa (STC, Standard Test Conditions), jolloin mittausolosuhteet muistuttavat laboratorio mittauksia ja ominaisuudet ovat lähempänä ideaalista tilannetta. STC-arvot vastaavat paneelin toimintaa olosuhteissa, jossa säteilyvoimakkuus $G_s = 1000 \text{ W/m}^2$, kennon lämpötila $T_p = 25^\circ\text{C}$ ja ilman massa AM = 1,5. Nämä arvot poikkeavat todellisista arvoista, mutta niitä käytetään paneelien, ja niiden valmistustekniikoiden, ominaisuuksien keskinäiseen vertailuun. Kun halutaan todellisempia arvioita, käytetään normaali operointi solun lämpötilaa (NOCT, Normal Operating Cell Temperature). NOCT-arvot vastaavat paneelin toimintaa olosuh-

teissa, jossa säteilyvoimakkuus $G_s = 800 \text{ W/m}^2$, ympäristön lämpötila $T_a = 20^\circ\text{C}$ ja tuulen nopeus $w = 1 \text{ m/s}$. (AM Solar)

Ilman massa AM kuvaa kuinka pitkän matkan auringon valo kulkee Maan ilmakehän läpi. $AM = 1$ on Maan ilmakehän tiheys, kun vastaavasti $AM = 0$ kuvaa auringon säteilyä avaruudessa. Ilman massa ilmoittaa vastaavasti käänteisarvon säteilyn tulokulmasta zeniitistä, jolloin $48,2^\circ$ kulmasta saapuva säteily vastaa ilman massaa $AM = 1,5$. Tämä voidaan ilmentää kuvasta 12. (EYE Lightning International)



Kuva 12. Ilman massan määrittelmä auringon säteilyn tulokulman avulla. (EYE Lightning International)

Aurinkopaneelin hyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään paneelilta saatava sähköteho, auringon säteilyteho sekä paneelin pinta-ala. (Finnwind Oy)

Lasketaan seuraavaksi esimerkkilasku paneelin hyötysuhteen määrittämiseksi. Käytetään laskennassa taulukon 2 paneelin ominaisuuksia ja säteilyvoimakkuutena yleistä STC-arvoa.

Taulukko 2. Laskuesimerkin paneelin ominaisuudet.

Huippuvirta I_{\max} [A]	Huippujännite U_{\max} [V]	Leveys / Pituus [m]
7,89	36	1,956 / 0,992

Paneelilta saatava sähköteho:

$$P_e = U_{\max} \cdot I_{\max} = 36V \cdot 7,89A = 284W$$

missä U_{\max} on maksimitehopisteen jännite ja I_{\max} maksimitehopisteen virta.

Säteilyteho, kun säteilytsvoimakkuus $G_s = 1000 \text{ W/m}^2$

$$P_s = G_s \cdot A_p = 1000W / m^2 \cdot (1,956m \cdot 0,992m) = 1940W$$

missä G_s on säteilytsvoimakkuus ja A_p paneelin pinta-ala.

Paneelin hyötysuhde tällöin

$$\eta = \frac{P_e}{P_s} = \frac{284W}{1940W} = 0,146$$

missä P_e on maksimitehopisteen sähköteho ja P_s säteilyteho.

Edellä laskettu hyötysuhde $\eta = 14,6\%$ on laskettu STC-arvoilla, jolloin laskettu hyötysuhde on vain suuntaa antava. Tarkempi hyötysuhteen määrittäminen vaatisi käytönaikaisia mitaustuloksia paneelin toiminnasta sekä toimintaympäristön tarkastelua, kuten vuosittaisen säteilymäärän mittaamista.

Tarkastellaan seuraavaksi johtimen valintaa paneeleilta kuormalle. Johtimen valinta tapahtuu pääosin sen poikkipinta-alan perusteella, jonka määrittämiseen tarvitsemme tiedot paneelien syöttämästä kuormituksen aikaisesta virrasta sekä johtimien sijoitus- ja asennustavoista.

Paneeleiden sarjoitus määrää paneeleilta saatavan jännitteen suuruuden. Vastaavasti kuormituksen aikaisen tehon ja jännitteen avulla voidaan määrittää virran suuruus, jonka perusteella kaapelit valitaan. Seuraavaksi tehdään esimerkkimitoitus kaapelille paneeleilta kuormalle asti, jolloin sähkö siirretään tasavirtana ja vaihtovirtamuunnos tehdään kuormien luona.

Oletetaan yhdeltä paneeliryhmältä saaduksi tehoksi 5 kW, jännitteen ollessa 600 V_{DC}. Tehdään kaapelin mitoitus huomioiden kaapelin kuormitettavuus ja tarvittavat korjauskerroimet asennustavan mukaan.

Kuormitusvirta annetuilla lähtöarvoilla:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5 \cdot 10^3 \text{ W}}{600 \text{ V}} = 8,33 \text{ A}$$

missä P on paneeliryhmän teho ja U käyttöjännite.

Tarkastellaan kaapelivaihtoehtoa PVC-eristeinen kuparijohdin $A = 2,5 \text{ mm}^2$
Lasketaan virran korjaukset käyttäen korjauskertoimia:

Lämpötilankorjauskerroin, kun $T = 35 \text{ °C}$

$$k_{j1} = 0,88$$

Rinnakkaisten kaapeleiden korjauskerroin erilliselle kaapeliryhmälle

$$k_{j2} = 0,8$$

Kokonaiskorjauskertoimeksi saadaan tällöin

$$k_i = k_{j1} \cdot k_{j2} = 0,736$$

Huomioimalla korjauskerroin, saadaan kaapelin kuormituksen vähimmäisvaatimus:

$$I_{zi} = \frac{I}{k_i} = \frac{8,33 \text{ A}}{0,736} = 11,32 \text{ A}$$

Tarkastelemamme kaapelin kuormitettavuus, kun kaksi kuormitettua johdinta, on $I_{ki} = 17 \text{ A}$. Tällöin kuormitettavuus ei ylitä, jolloin voidaan valita PVC-eristeinen $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ kuparijohdin yksittäiseltä paneeliryhmältä kuormalle.

3. MIKROVERKKOJÄRJESTELMÄ

Mikroverkkojärjestelmä muodostuu pääasiassa mikrotuotantolaitoksesta, siirtojärjestelmästä sekä kuormasta. Lisäksi monipuolisemmat mikroverkot saattavat sisältää myös verkon sisäisen informaatiojärjestelmän, joka tukee mikrotuotantoa. Mikroverkkojärjestelmää pidetään yleensä sisäisenä verkkona, jossa verkon käyttämä sähkö tuotetaan yksinomaan omassa verkossa ilman ulkopuolista sähköntuotantoa. Mikroverkko on kuitenkin melko laaja käsite ja voi tarkoittaa myös järjestelmää, jossa verkon kuormat saavat sähköä normaalista sähköverkosta sekä lisätuotantona paikallisesti esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaloilta. Mikroverkkojärjestelmiin kuuluu useimmiten myös sisäistä tiedonkulkua siirtojärjestelmän ohella, jota voi kuvastaa tarkastelemalla nykyisiä sekä tulevia smart-grid toteutuksista. Mikroverkoissa tulee huomioon otavaksi runsaasti eri näkökohtia, kuten muun muassa paikallisen sähköntuotannon liittäminen yhteensopivaksi nykyisen sähköverkon kanssa sekä liittämistä koskevat suojaukset ja rajoitukset.

Mikrotuotantolaitos käsittää yleensä kulutuskohteen yhteyteen kytketyn sähköntuotantolaitoksen, jonka ensisijainen tarkoitus on tuottaa sähköä kyseiseen kulutuskohteeseen. Nykyisten ohjearvojen pohjalta mikrotuotannoksi luokitellaan korkeintaan 11 kW laitokset, jotka liitetään verkkoon enintään 3x16A sulakkeilla. Nämä ohjearvot ovat kuitenkin vain suosituksia ja niitä voidaan soveltaa verkkoyhtiöittäin koskemaan suurempiakin laitoksia. (Energiateollisuus ry, YA9:09)

4. AURINKOVOIMALAN LIITTÄMINEN LUT GREEN CAMPUS JÄRJESTELMÄÄN

4.1 Green Campuksen mikroverkkojärjestelmästä

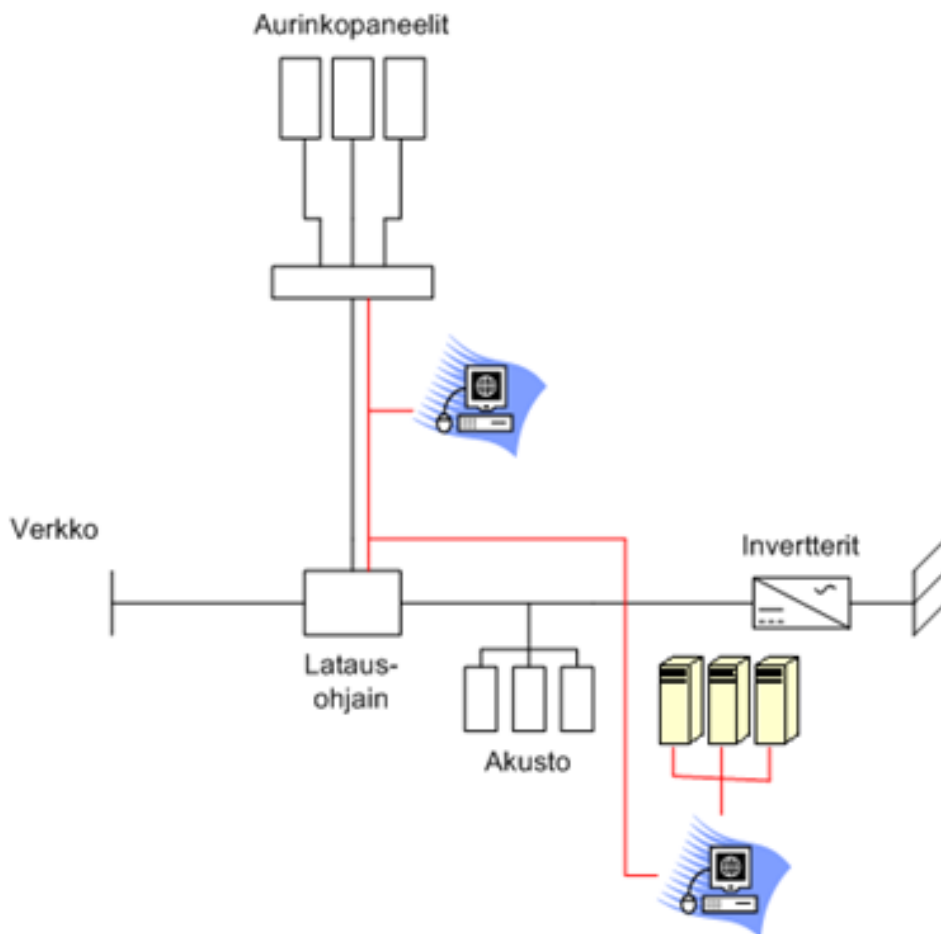
Green Campuksen mikroverkko koostuu hajautetusta energiantuotannosta tuuli- ja aurinkovoimalla, energiavarastosta sekä mahdollisesti informaatiojärjestelmästä, joka kykenee seuraamaan järjestelmän toimintaa sekä välittämään tietoa sitä kerääville yksiköille. Hajautettu energiantuotanto liitetään rakennuksen yleiseen sähköverkkoon, jossa se toimii yhdessä yleisen sähköjakelun rinnalla. Energiavarastona toimivat akut, joihin voidaan halutessa siirtää energiaa kulutuksen sijasta. Informaatiojärjestelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi yhtenäisenä järjestelmänä, joka kerää tietoa tuuli- ja aurinkovoimaloilta. Tällaista tiedonkeruuta voisi olla esimerkiksi voimaloiden nykyisen hetken tehontuotanto ja erinäiset sähköteknilliset suureet, joita voitaisiin hyödyntää tutkimuskäytössä.

Informaatiojärjestelmä koostuu mittalaitteista, tiedonsiirrosta sekä laitteistosta tiedon käsittelyyn ja tallentamiseen. Mittalaitteistona voidaan käyttää voimaloiden omia tehoelektronikan laitteita, sillä niiden yhteydestä löytyy useimmiten riittävän laajat mittaustoiminnot sekä tiedon välittäminen ulospäin. Tiedonsiirto voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä sarjaportteja ja valokaapelia tai vaihtoehtoisesti käyttämällä langatonta tiedonsiirtoa. Nykyiset tehoelektronikkalaitteet tarjoavat laajalti mahdollisuuksia näihin edellä mainittuihin ratkaisuihin. Valokaapeli voidaan helposti vetää yhdessä sähkönsiirtojohtojen yhteydessä mahdollistaen nopean ja toimintavarman tiedonsiirron voimaloilta tiedonkeruuyksiköille.

4.2 Aurinkovoimala osana Green Campuksen mikroverkkojärjestelmää

Aurinkovoimala toteutetaan hajautetusti yliopiston rakennuksen yhteyteen siten, että paneelit jaetaan useisiin ryhmiin ja sijoitetaan eri kohteisiin. Tällä voidaan tuoda esille mittauksellisia näkökulmia sekä tuoda paneelit paremmin esille, mikäli halutaan paneeleiden sijoituksessa huomioida järjestelmän esittelytarkoitus. Aurinkovoimalaan kuuluu tehonsiirron lisäksi myös tiedonsiirtoa, jota käsiteltiin kappaleessa 4.1. Tiedonsiirtoa tarvitaan demonstroimaan paneeleiden toimintaa sekä mahdollistamaan mittaukset tutkimuskäytölle. Tiedonsiirtoa tarvitaan myös aurinkovoimalan ohjaukseen, erityisesti akuston käyttöön sekä mahdollisen kehittyneemmän suojauksen toteuttamiseen, esimerkiksi taustaverkon menettämisen varalta releiden keskinäisen kommunikaatioyhteyden toteuttamiseen.

Tehonsiirto paneeleilta voidaan toteuttaa eri tavoin. Paneeleilta saatava tasasähkö heti paneeleilta inverttereiden avulla vaihtosähköksi ja siirtää sähkö kulutuskohteille tai vaihtosähkömuunnos voidaan tehdä vasta lähempänä kulutuskohteita. Jälkimmäinen ratkaisu tarjoaa laajemmat soveltamisen mahdollisuuden järjestelmän suunnittelun ja toteutuksen kannalta, sillä tällöin voidaan paneeleilta saatu sähkö hyödyntää siirron aikana tasasähköä käyttävillä kohteilla, kuten akut, ja lopuksi vaihtosähköä käyttävillä. Mikäli vaihtosähkömuunnos tehdään jo heti paneelien jälkeen, tulee akkujen sijoittaminen ja lataaminen toteuttaa paneelien yhteyteen tai muuten järjestelmässä tarvitaan ylimääräisiä sähkömuunnoksia järjestelmässä. Sähkönsiirto tasavirtana mahdollistaa myös pienemmät siirtohäviöt, vaikkakin siirtoetäisyydet tarkasteltavassa järjestelmässä ovat melko lyhyet. Tämä myös suosii ratkaisua tehdä vaihtosähkömuunnos vasta varsinaisen kuorman lähetyvillä. Kuvassa 13 on aurinkovoimalan järjestelmätopologia, jota voidaan pitää suuntaa antavana esimerkkinä Green Campuksen aurinkovoimalan toteutuksesta.



Kuva 13. Järjestelmätopologia aurinkovoimalasta. Kuvassa mustat viivat kuvaa sähkönsiirtoa ja punainen viiva tiedonsiirtoa.

Kuvassa 13 on esimerkki järjestelmästä, jossa sähkö siirretään tasavirtana paneeleilta latausohjaimen kautta lähestulkoon kuormalle asti. Vaihtosähkömuunnos toteutetaan siis vasta kuorman luona. Kuvan mukaan tiedonsiirron muodostaa tietokoneiden välinen järjestelmä, joiden välillä tiedonsiirto on toteutettu valokuituverkoston välityksellä. Lisäksi voidaan käyttää langatonta tiedonsiirtoa. Tiedon keräämisen laajuus ja monipuolisuus on hyvä olla selvillä suunniteltaessa tämän kaltaista järjestelmää, sillä usein aurinkovoimalan toteuttamiseen tarvittavat välttämättömät komponentit, kuten invertterit tai latausohjaimet, saattavat tarjota ominaisuuksissaan mahdollisuuden tiedonkäsittelyyn tai –siirtämiseen muiden laitteiden välillä. Tällöin tiedon kerääminen ja siirtäminen saadaan mahdollistettua ilman erillistä järjestelmää. Kuvan järjestelmässä tiedonkäsittelyjärjestelmän muodostaa tietokoneohjaus paneelien läheisyydessä, joka on yhteydessä latausohjainlaitteistoon sekä päätietokoneisiin, jotka vastaavat koko järjestelmän tiedonkäsittelystä ja tallentamisesta.

5. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoitus oli tarkastella sähköä tuottavan aurinkovoimalan soveltuvuutta Suomen oloissa sekä tuoda esille teknisiä ja taloudellisia näkökulmia, jotka tulisi ottaa huomioon toteutettaessa kyseisiä voimaloita. Tämä työ pohjautui Lappeenrannan teknillisen yliopiston Green Campus-projektiin ja sen 20 kW aurinkovoimalan toteutukseen.

Tämän työn aurinkovoimalan toteutus pohjautui mikroverkkoon kytkettävästä järjestelmästä ja tämän voimalan toteutusta on suunniteltu pääosin tutkimuskäytön kannalta. Tämän työn sisällössä on käyty läpi kaikki pääasialliset komponentit, jotka tarvitaan sähkötehoa tuottavan voimalan toteuttamiseen. Koska tarkastelun kohteena on ollut voimalan yhdistäminen mikroverkkoon, on järjestelmän toteutusta laajennettu koskemaan myös tiedon-siirto.

Työssä tarkasteltiin aurinkovoimalan tuomia etuja niin sähköntuotannon kuin asuinrakentamisen kannalta. Työhön kuului myös taloudellista tarkastelua käyttäen LCOE-menetelmää, jonka perusteella saatiin määritettyä rahallinen arvo tyypilliselle aurinkovoimalalla tuotetulle sähkölle. Aurinkovoimalan kustannustehokkuutta arvioitiin aurinkoseuraajien kanssa ja ilman.

LÄHTEET

Aarnio, P. Aurinkosähköteknologiat. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.1.2012]. Saatavilla <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>

AM Solar, Inc. 2012. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.4.2012]. Saatavilla http://www.amsolar.com/home/amr/page_164

Blue Sky Energy, Inc. 2012. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.1.2012]. Saatavilla http://www.blueskyenergyinc.com/uploads/pdf/BSE_What_is_MPPT.pdf

Energiateollisuus ry. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. YA9:09. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.3.2012]. Saatavilla <http://www.energia.fi/julkaisut/mikrotuotannon-liittaminen-sahkonjakeluverkkoon-ya909>

Energiateollisuus ry. Sähköntuotannon liittämisehdot TLE 11. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2011]. Saatavilla http://www.energia.fi/sites/default/files/tuotannon_liittamisehdot_tle11.pdf

EurObserv'ER. Photovoltaic barometer 2011. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.3.2012]. Saatavilla <http://www.eurobserv-er.org/press.asp>

European Photovoltaic Industry Association. Solar photovoltaics competing in the energy sector. 2011. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.3.2012]. Saatavilla <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook/solar-photovoltaics-competing-in-the-energy-sector.html>

Eurosolar Oy. Aurinkoenergiaopas [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2012]. Saatavilla <http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/>

EYE Lightning International of North America. [viitattu 4.4.2012]. Saatavilla <http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-energy.htm>

Finnwind Oy. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.4.2012]. Saatavilla <http://www.finnwind.fi/aurinkovoima/#aurinkopaneelin-hyotysuhde>

Fraas, L. Partain, L. Solar cells and their applications. 2010. ISBN 978-0-470-44633-1 Wiley, cop. 2. painos

Genergia Ky. Aurinkoenergiaopas. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.1.2012]. Saatavilla <http://www.genergia.fi/aurinkoenergiaopas/>

Hermia Oy. Adine project, Loss of Mains Protection Issues. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2012]. Saatavilla <http://hermia-fi-bin.directo.fi/@Bin/19f7c63980f10bf8a8cf23f9c8b15694/1326452821/application/pdf/747113/Loss-of-Mains-web.pdf>

Ilmatieteen laitos. Energialaskenta. 2012. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.5.2012]. Saatavilla <http://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>

Lappeenrannan Energia Oy. Taipale, Arto. [puhelinkeskustelu]. [keskustelu käyty 3.4.2012]

Larjola, J. Punnonen, P. Uusitalo, A. 2011 kurssin Uusiutuva energia luentomoniste

Partanen, Jarmo. 2012 kurssin Sähköenergiatekniikan perusteet oppikirja. Luku 10: Tehoelektroniikan perusteet.

Renewables 2010 Global Status Report [verkkodokumentti]. [viitattu 4.3.2012]. Saatavilla <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2010/tabid/5824/Default.aspx>

Savonia ammattikorkeakoulu. Auringonpaiste ja aurinkoenergiantuotto Varkaudessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2012]. Saatavilla <http://dmkk.savonia.fi/energialabra/index.php/saaasema>