

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Suuren kokoluokan aurinkovoimalan sähkösuunnittelu

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri, Otso Salonen

Lappeenranta 16.12.2018

Mikko Ropo

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Mikko Ropo

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri, Otso Salonen

Suuren kokoluokan aurinkovoimalan sähkösuunnittelu, Electrical design of large-scale solar power systems

27 sivua, 6 yhtälöä, 8 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: aurinkosähkö, suunnittelu

Tässä energiatekniikan koulutusohjelman kandidaatintyössä käsitellään suuren kokoluokan (> 1 MW) aurinkosähköjärjestelmien sähkösuunnittelua. Työn tavoitteena on esitellä suurten aurinkosähköjärjestelmien tärkeimmät osat, sekä niiden valintaan ja mitoittamiseen vaikuttavat tekijät. Tutkimusmenetelmänä on aiheesta kirjoitetun kirjallisuuden tutkiminen. Lisäksi tutkitaan voimalan kokoluokan vaikutusta suunnitteluun pienen ja suuren kokoluokan voimaloiden välillä. Aiheesta ei ole tehty juurikaan tutkimusta aiemmin Suomessa, vaikka Suomeen onkin jo suunnitteilla MW-kokoluokan aurinkovoimaloita.

Aurinkovoimalan tärkeimmät osat ovat aurinkopaneelit, vaihtosuuntaaja, kaapelit, suojalaitteet ja maadoituksen osat. Aurinkovoimalan suunnitteluun kuuluvat sähköisten laitteiden valitseminen ja mitoittaminen, jotka suoritetaan noudattaen IEC- ja SFS-standardeja. Merkittävin ero suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän ja pienitehoisen järjestelmän välillä on kytkentä suurjännite tai keskijänniteverkkoon muuntajan ja kytkinlaitteiston välityksellä. Lisäksi suuren kokoluokan voimaloilla on omat turvallisuusmääräyksensä ja standardinsa, jotka vaikuttavat suunnitteluprosessiin eri vaiheisiin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	5
2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ	6
2.1 Järjestelmän osat.....	6
2.2 Aurinkovoimalan rakenne	7
3 AURINKOVOIMALAN SÄHKÖSUUNNITTELU	9
3.1 Sähkösuunnittelun vaatimukset	9
3.2 Voimalaitoksen komponenttien mitoittaminen ja laitevalinnat.....	9
4 AURINKOPANEELIT	11
4.1 Aurinkopaneeleita koskevat vaatimukset	12
4.2 Aurinkopaneeliketjun mitoittaminen.....	12
5 VAIHTOSUUNTAAJA	15
5.1 Vaihtosuuntaajaa koskevat vaatimukset.....	15
5.2 Vaihtosuuntaajan mitoittaminen.....	16
6 KAAPELOINTI	18
6.1 Kaapelointia koskevat vaatimukset	18
6.2 Kaapeleiden mitoittaminen.....	18
7 SUOJALAITTEET JA KYTKENTÄKOTELOT	20
7.1 Suojalaitteita koskevat vaatimukset	21
8 MAADOITTAMINEN	22
8.1 Maadoitusta ja potentiaalintasausta koskevat vaatimukset	22
8.2 Maadoitustavan valinta ja mitoittaminen	22
8.3 Salamasuojaus	23
9 MUUNTAJA JA KYTKINLAITTEISTO	24
9.1 Muuntajien valinta ja mitoittaminen	24
9.2 Muuntajia koskevat vaatimukset	25
10 VERTAILU PIENEN KOKOLUOKAN JÄRJESTELMIIN	26
11 YHTEENVETO	27
LÄHDELUETTELO	28

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

<i>I</i>	virta [A]
<i>K</i>	kerroin
<i>N</i>	lukumäärä
<i>T</i>	lämpötila [°C]
<i>U</i>	jännite [U]

Kreikkalaiset aakkoset

η	<i>hyötysuhde [%]</i>
αI	<i>virran muutos lämpötilan muutosta kohti kohti [%/°C]</i>
αU	<i>jännitteen muutos lämpötilan muutosta kohti [%/°C]</i>

Alaindeksit

OC	oikosulku- / avoimen piirin-
INV	vaihtosuuntajakohtainen
LOSS	häviö
MAX	maksimi-
MIN	minimi
PV	aurinkosähköpaneelisto
STC	standardiolosuhteissa mitattu
STR	paneeliketju

Lyhenteet

CIS	kupari-indium-seleeni
CIGS	kupari-indium-gallium-seleeni
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin-layer

1 JOHDANTO

Aurinkosähköjärjestelmien kysyntä on kasvanut 2000-luvulla ympäri maailman ja aurinkosähkön osuuden kasvu kansainvälisessä energiantuotantokokonaisuudessa on toistuvasti ylittänyt tehdyt ennusteet. Aurinkosähkön etuna on ilmaisen energian lisäksi mahdollisuus toteuttaa energiantuotanto hajautetusti usean eri kokoluokan voimaloissa. Voimalatyypit voidaan karkeasti jakaa jakeluverkkoon kytkettyihin suuren teholuokan voimaloihin eli aurinkopuistoihin, hajautettuihin mikrotuotantolaitoksiin ja verkon ulkopuolisiin paikallisiin tuotantolaitoksiin. (Stapleton & Neill, 2012 s.1-7)

Tässä kandidaatintyössä käsitellään suuren teholuokan (>1 MW) maa-asenteisen aurinkosähköjärjestelmän sähköistyksen suunnittelua, josta ei ole Suomessa aiemmin tehty juurikaan tutkimusta. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän tärkeimmät laitteet ja niiden valintaan vaikuttavat tekijät sekä sähköisen suunnittelun vaiheet keskittyen erityisesti siihen, miten aurinkovoimalan kokoluokka vaikuttaa suunnitteluun. Työ rajataan koskemaan pääasiassa aurinkovoimalan sähkösuunnittelua ja mitoittamista aurinkopaneeleiden ja muuntajan välillä.

Kandidaatintyön toimeksiantajana toimii aurinkosähköjärjestelmiä suunnitteleva ja toimittava GreenEnergy Finland Oy. Työn tutkimuksellisen tavoitteen lisäksi on tarkoitus tuottaa GreenEnergy Finland Oy:lle asiakirja, jota voidaan käyttää apuna suunnittelussa ja uusien suunnittelijoiden perehdytyksessä. Tiedon hankinnassa hyödynnetään GreenEnergy Finland Oy:n tarjoamaa materiaalia, aihetta koskevia standardeja, valmistajien tuotekatalogeja sekä aurinkosähköjärjestelmiä käsitteleviä kirjallisia lähteitä.

Aluksi työssä käydään läpi verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän toiminta ja voimalan tärkeimmät komponentit. Tämän jälkeen syvennytään suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän suunnittelun vaiheisiin ja standardien asettamiin vaatimuksiin. Lopuksi tehdään yhteenveto merkittävimmistä eroista pieni- ja suuritehoisten aurinkosähköjärjestelmien välillä.

2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

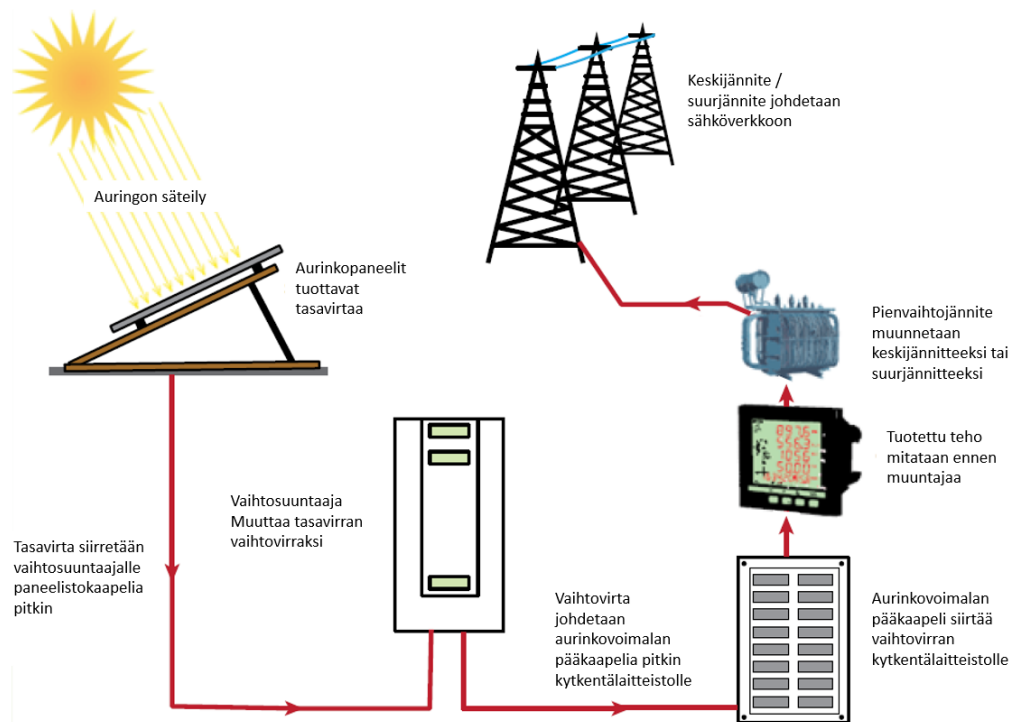
Aurinkovoimala on sähköinen järjestelmä, joka tuottaa valosähköisen ilmiön avulla sähköä suoraan auringon valosta. Aurinkosähköjärjestelmät kehitettiin alunperin satelliittien energianlähteiksi, minkä jälkeen ne tuoteistettiin sähköverkon ulkopuoliseen energiantuotantoon. Vaihtosuuntaajateknologian kehityttyä ja aurinkopaneelien hintojen laskettua on tullut taloudellisesti kannattavaksi toteuttaa myös verkkoon kytkettyjä megawattiteholuokan aurinkovoimaloita (IFC 2015 s.3).

Aurinkosähköjärjestelmiä voidaan toteuttaa monissa eri kokoluokissa pienistä alle kilowatin tehoisista järjestelmistä aina suuriin satojen megawattien aurinkopuistoihin asti (Stapleton & Neill 2012 s.1-7). Toimintaperiaate pysyy kaikissa näissä suuruusluokissa pääpiirteittäin samana, mutta suuruusluokka vaikuttaa silti merkittävästi voimalasuunnitteluun ja voimalassa käytettäviin laitteisiin. Merkittävimpänä erona suuren kokoluokan järjestelmässä on voimalan vaatima suuri pinta-ala. Lisäksi suuri teho ja sen myötä suuret virrat ja jännitteet vaikuttavat aurinkovoimalan sähkösuunnitteluun. (IFC 2015)

2.1 Järjestelmän osat

Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän tärkeimmät toiminnalliset osat ovat sähköä tuottavat aurinkopaneelit ja vaihtosuuntaaja. Paneelit tuottavat auringonvalosta tasavirtaa, joka johdetaan kaapeleita pitkin vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaaja muuttaa tasavirran vaihtovirraksi halutulla jännitteellä ja taajuudella. Aurinkovoimalan toiminnan kannalta olennaisia sähköisiä osia ovat myös suojalaitteet, maadoituskomponentit, sekä paneelien ja invertterin välinen kaapelointi. (Bruno 2016 s.136, s.162)

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmät vaativat lisäksi verkkojännitemuuntajan, jotta teho saadaan siirrettyä jakeluverkkoon. Verkkokytkeensä liittyy myös omat suojalaitteensa. Sähkökeskus ja tehonmittaus ovat usein aurinkovoimalarajapinnan ulkopuolella ja ne on tällöin sijoitettu verkonhaltijan omistamalle maa-alueelle. (IFC 2015 s.25) Megawattiteholuokan aurinkovoimalan tärkeimmät komponentit on esitetty kuvassa 1.

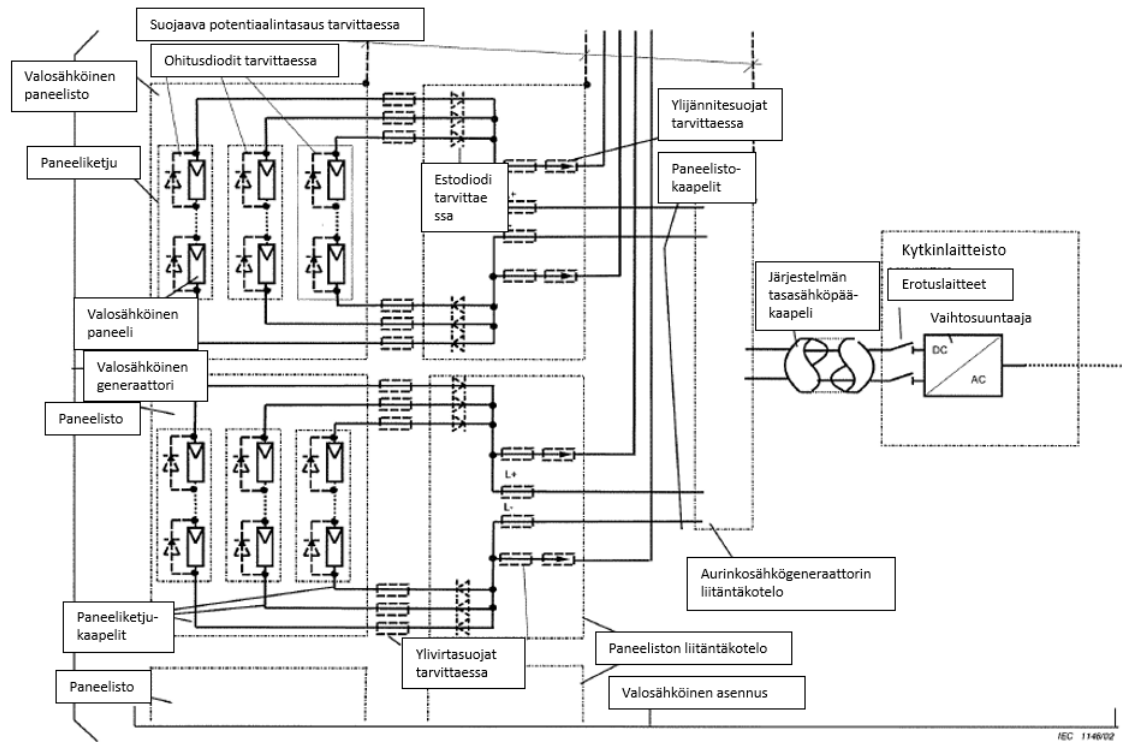


Kuva 1. MW-kokoluokan aurinkovoimalan komponentit (IFC 2015 s. 24)

2.2 Aurinkovoimalan rakenne

Jännitehäviöiden minimoimiseksi voimalaitoksen tulisi toimia mahdollisimman korkealla jännitteellä (IFC 2015 s.76). Voimalaitoksen jännite saadaan kasvatettua halutulle tasolle kytkemällä aurinkopaneeleita sarjaan, eli muodostamalla paneeliketjuja. Paneeliketjuja kytketään tämän jälkeen rinnan niin paljon, että saadaan tuotettua haluttu teho. Suuren kokoluokan aurinkovoimalassa rinnankytketyistä paneeliketjuista muodostetaan näin osapaneelistoja, joiden kytkentäkoteloilta paneeliston tuottama sähkö siirretään osapaneelistokaapelilla invertterille. (SFS käsikirja 607)

Suurimmillaan aurinkovoimalaitoskokonaisuus voi koostua jopa miljoonista aurinkopaneeleista ja sen yhteenlaskettu huipputeho voi olla tuhansia megawatteja (Power Technology 2018). Keskusvaihtosuuntaajat ovat kuitenkin teholtaan korkeintaan muutaman megawatin tehoisia, joten voimalaitoskokonaisuus koostuu useasta pienemmästä aurinkopuistosta, joissa jokaisessa on oma vaihtosuuntaaja ja muuntaja. Megawatin huipputehoinen aurinkopaneelientä toteutettuna piikidepaneeleilla sisältää paneelitehosta riippuen noin 3000-4000 paneelia. Kuvassa 2 on esitetty useista paneelistoista koostuvan aurinkovoimalan yleiskaavio.



Kuva 2. Esimerkkikuva useista paneelista koostuvan aurinkovoimalan yleiskaaviosta (SFS-käsikirja 607 s. 75)

3 AURINKOVOIMALAN SÄHKÖSUUNNITTELU

Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu vaatii osaamista useilta eri aloilta ja erilaisten teknologioiden laajaa tuntemusta. Järjestelmäsuunnittelussa vaaditaan tarkat tiedot voimalan eri osien ja laitteiden toiminnasta ja ominaisuuksista. Erilaisia teknologiavaihtoehtoja on tarjolla runsaasti, minkä vuoksi perehtyminen tuotteiden ominaisuuksiin ja tuotteiden välinen vertailu on tärkeä osa onnistunutta voimalasuunnittelua. Lisäksi suunnittelussa on noudatettava paikallisia standardeja ja säädöksiä. (Gevorkian 2011 s. 185, 186)

Suuren kokoluokan voimalaitoksen suunnittelu aloitetaan osana projektin kannattavuustarkastelua ja se perustuu valitun kohteen ominaisuuksiin, joista tärkeimpiä ovat aurinkoenergian tuotantoarvio ja siihen vaikuttavat tekijät, kuten lämpötila ja varjostukset. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän ominaisuudet ja maanpinnan muodot, lähialueen sähköverkko, ympäristövaikutukset ja sosiaaliset vaikutukset. Suuren kokoluokan järjestelmissä suunnittelun tärkeimpänä tavoitteena on optimoida tuotanto LCOE:n (Levelised Cost of Electricity) minimoimiseksi. (IFC 2015 s. 5, 66)

Aurinkopaneelikentän asemapiirustus ja valittu vaihtosuuntaajateknologia vaikuttavat merkittävästi sähkösuunnitteluun. Asemoinnin suunnittelussa on siksi pyrittävä huomioimaan sähkösuunnittelun tarpeet jättämällä tilaa kaapelivedoille ja minimoimalla kaapelivetojen pituudet. (IFC 2015 s. 76)

3.1 Sähkösuunnittelun vaatimukset

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmät kytketään joko keskijänniteverkkoon tai suurjänniteverkkoon voimalan suuruusluokasta riippuen. Suuruusluokasta riippumatta aurinkovoimalan tasasähköpuoli toteutetaan pienoispääjännitteellä. Tällöin tasasähköpuolella voidaan noudattaa pääosin samoja määräyksiä kuin pienemmissä aurinkosähköjärjestelmissä, kunhan pysytään standardien asettaman maksimijännitteen rajoissa. Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmiä koskevat muutokset ja lisähuomiot on esitetty IEC-standardissa IEC TS 62378 ja ne koskevat pääasiassa suojalaitteiden vaatimuksia ja alueen rajaamista epäpäteviltä henkilöiltä (IEC-62548 s. 28)

Pienjänniteasennus-standardin SFS-6000 piiriin kuuluva suurin tasajännite on 1500 Vdc (SFS-6000 s.5). Kuitenkin standardissa IEC-62378 on erikseen määrätty, että rakennukseen asennettavan aurinkovoimalan suurin sallittu tasajännite on 1000 Vdc. Mikäli voimala asennetaan maatelineillä, 1000 voltin jänniteraja voidaan ylittää, mutta tällöin paneelistoon, sen kaapelointiin ja suojalaitteisiin pääsy on rajattava ammattihenkilöille. (IEC-62548 s. 28) Suuren kokoluokan aurinkovoimalat asennetaan lähes poikkeuksetta maatelineitä käyttäen, jolloin aurinkopaneelien ja muiden laitteiden tasajännitekestoisuutena käytetään korkeampaa rajaa 1500 Vdc.

3.2 Voimalaitoksen komponenttien mitoittaminen ja laitevalinnat

Suuren kokoluokan järjestelmissä komponenttien oikeaoppinen mitoittaminen ja sopivien laitteiden valinta on erityisen tärkeää energiantuotannon takaamiseksi. Aurinkovoimalan sähkösuunnittelu suoritetaan aina projektikohtaisesti, koska jokainen voimalaitos on olosuhteiltaan ja ominaisuuksiltaan erilainen. Mitoittaminen tehdään yleensä sitä varten

suunnitelluilla ohjelmistoilla, mutta laskelmat tulisi tarkistaa myös manuaalisesti. (IFC 2015 s.76)

Aurinkovoimalaa suunniteltaessa ja mitoitettaessa on otettava huomioon lukuisia tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. IEC-standardissa 62548 on listattu merkittävimmiksi paneeliston tuotantoon vaikuttaviksi tekijöiksi varjostukset, lämpötilanvaihtelut, kaapeleiden jännitteenalenema, paneelien likaantuminen, paneelien sijoittelu ja suuntaus sekä aurinkokennojen huonontuminen (IEC-62548 s.26). Lisäksi aurinkopaneelin tuotanto vaihtelee sään ja vuodenajan mukaan, minkä vuoksi voimalan sähköntuotanto ei ole tasaista.

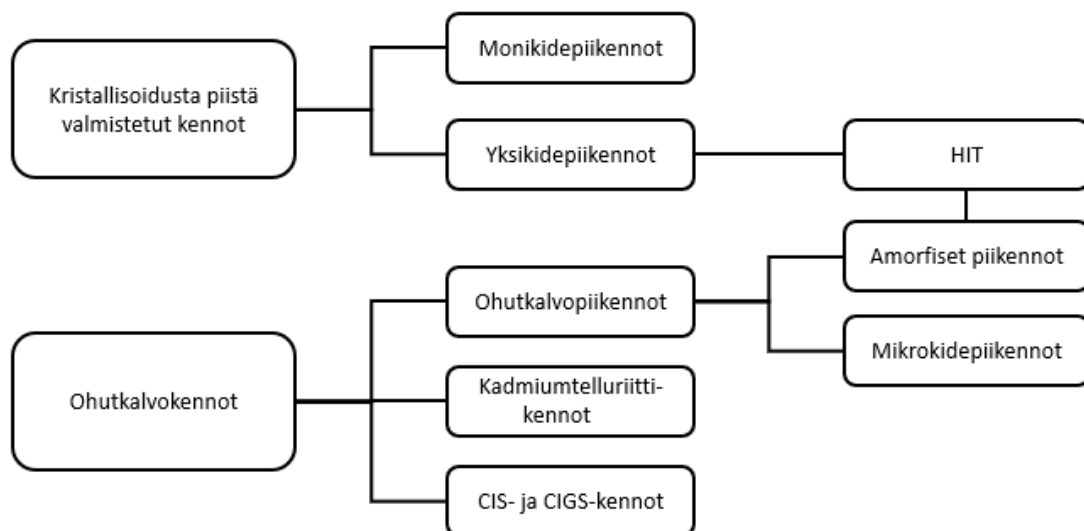
Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa pyritään pääasiassa minimoimaan kaapeleissa ja komponenteissa tapahtuvat häviöt ja valitsemaan mahdollisimman hyvin sähköisesti yhteensopivat laitteet. Lisäksi tavoitteena on toteuttaa sähköistys turvallisesti standardien ja lainsäädännön mukaisesti käyttämällä vaadittuja suojausmenetelmiä. (IFC 2015 s.76-80) Seuraavissa luvuissa tutustutaan tarkemmin aurinkosähköjärjestelmän laitteiden valintaperusteisiin, mitoittamiseen sekä laitteille asetettuihin vaatimuksiin.

4 AURINKOPANEELIT

Aurinkopaneeli on puolijohdetekniikkaan perustuva jännitelähde, joka tuottaa auringon valosta energiaa valosähköisen ilmiön avulla (Gevorkian 2011 s. 1). Paneelityyppejä on markkinoilla useita erilaisia ja niiden ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi toisistaan. Tärkeimpiä paneelityypin valintaan vaikuttavia ominaisuuksia ovat huipputeho, hyötysuhde ja paneelin kyky kestää vallitsevia olosuhteita. Viime kädessä myös paneelin hinta muodostuu merkittäväksi tekijäksi, sillä voi olla taloudellisesti kannattavampaa toteuttaa järjestelmä suuremmalla määrällä pienitehoisia ja huonommalla hyötysuhteella toimivia paneeleita. (IFC 2015 s.25)

Merkittävimmät kaupalliset aurinkopaneelityypit ovat piikidepaneelit ja ohutkalvopaneelit. Piikidepaneelit jaetaan kennon valmistusprosessin mukaan yksikide- ja monikidepaneeleihin. Yksikidepaneelit ovat hyötysuhteeltaan parempia, mutta kalliimpia kuin monikidepaneelit (IFC 2015 s.25-26)

Ohutkalvopaneelityyppejä on useita ja niissä hyödynnetään monipuolisesti erilaisia kemikaaleja. Ohutkalvopaneelien etu on edullinen ja vähän energiaa kuluttava tuotantoprosessi. Toisaalta ohutkalvopaneelien hyötysuhteet eivät ole erityisen hyviä piikidepaneeleihin verrattuna. (IFC 2015 s. 26) Ohutkalvopaneelien osuus aurinkopaneelimarkkinasta on melko pieni piikenneihin verrattuna (Fraunhofer, 2018 s. 4, 20). Tämän vuoksi todennäköisin vaihtoehto suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän paneeliksi on yksi- tai monikidepiipaneeli. Tällä hetkellä yleisimmin käytetyt paneeliteknologiat on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Yleisimmät markkinoilla olevat aurinkopaneelityypit (IFC 2015 s.26)

Tavallisesti piikideaurinkopaneeli koostuu useista sarjaan kytketyistä aurinkokennoista. Teholuokaltaan kaupalliset paneelit ovat yleensä 200-330 piikkiwattisia ja sisältävät joitakin kymmeniä kennoja. (Bruno 2016 s.137) Verkkoon kytkettyjen järjestelmien

kennot on yleisimmin valmistettu monikiteisestä piistä kohtuullisen hyötysuhteen (13% – 18%) ja taloudellisesti kannattavan hankintahinnan takia (Boxwell 2014 s.69-70).

4.1 Aurinkopaneeleita koskevat vaatimukset

Paneelien valinnassa on tarkastettava, että ne noudattavat asennuskohteessa käytössä olevia standardeja. Suomessa tärkeimmät aurinkopaneeleihin liittyvät standardit ovat SFS-EN 61730, SFS-EN 61215 ja SFS-EN 61646. Mitoituksessa tulee käyttää aurinkopaneelin avoimen piirin jännitteelle ja oikosulkuvirralla lämpötilavaikutuksen huomioivia suureita $U_{OC\ MAX}$ ja $I_{SC\ MAX}$ (SFS-6000-712 s. 14-15).

Standardin IEC 61370-1 mukaisesti, kun kyseessä on yli 60 V sähköasennus, on paneelien oltava luokkaa A ja suojausluokkaa II. Lisäksi ylitettäessä 50 V jännite paneeleissa on oltava sisäänrakennetut ohitusdiodit heikentämässä varjostuksen vaikutuksia. (SFS-käsikirja 607 s. 36). Suurissa aurinkosähköjärjestelmissä tähän vaatimukseen ei ole poikkeuksia.

Kaikilla voimalan samalle MPP-seuraimelle rinnan kytketyillä paneeliketjuilla tulee olla sama mitoitusjännite, eli paneelien tulee olla samanlaisia ja ketjuissa tulee olla yhtä monta paneelia. (IEC 62548 s. 24) Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että eri paneelityyppejä tai merkittävästi eri ikäisiä paneeleja ei tulisi missään tapauksessa sekoittaa keskenään.

Hyötysuhteen ja tehontuoton lisäksi suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä tulee ottaa huomioon paneelien tasajännitekestoisuus, mikä vaikuttaa siihen, kuinka monta paneelia pystytään kytkemään sarjaan yhdessä paneeliketjussa. Tasajännitekestoisuus piikidepaneeleilla on yleensä joko 1000 V tai 1500 V ja paneelien lisäksi myös muiden komponenttien kestoisuus tulisi valita samalle tasolle. (Stapleton & Neill, 2012 s. 125)

4.2 Aurinkopaneeliketjun mitoittaminen

Aurinkopaneelien osalta järjestelmän mitoittamisessa olennaista on paneelityypin valinta ja paneeliketjun sisältämien paneelien lukumäärän määrittäminen. Voimalasuunnittelussa pyritään mitoittamaan yhteen paneeliketjuun mahdollisimman monta paneelia, jotta vaihtosuuntaajaan heräämisjännite saavutetaan mahdollisimman pienellä insolaatiolla, eli auringon säteilyenergian määrällä. Lisäksi suuremmilla jännitteillä kaapeleissa tapahtuvat häviöt ovat pienemmät. (IFC 2015 s. 76) Mitoittamisen periaatteet eivät siis poikkea pienemmistä aurinkovoimaloista.

Mitoittamisen kannalta tärkeimmät tiedot ovat aurinkopaneelin avoimen piirin jännite $U_{OC\ STC}$ ja oikosulkuvirta $I_{SC\ STC}$. STC tarkoittaa, että suureet on mitattu standardiolosuhteissa, eli 25 °C lämpötilassa, 1000 W/m² säteilyteholla ja ilmamassalla 1.5 On tärkeää huomioida, että standardiolosuhteista poiketessa avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran arvot muuttuvat paneelin resistanssin muuttuessa lämpötilan vaikutuksesta. Tämän vuoksi paneelin tiedoissa ilmoitetaan myös virran ja jännitteen prosentuaaliset lämpötilariippuvuudet αI_{SC} ja αU_{OC} . (Stapleton & Neill, 2012 s. 48-49)

Paneeliketjun jännitettä laskettaessa on otettava huomioon ympäristön minimi- ja maksimilämpötilat, koska lämpötila vaikuttaa kaapeleissa ja paneeleissa tapahtuviin häviöihin. (Stapleton & Neill, 2012 s. 127) Standardin SFS-6000-712 liitteen B

mukaisesti paneeliketjun mitoittamista varten vaadittava nimellisjännite $U_{OC\ MAX}$ tulee laskea yhtälöllä 1

$$U_{OC\ MAX} = \left(1 + \frac{\alpha U_{OC}}{100}\right) \cdot (T_{MIN} - 25) \cdot U_{OC\ STC} \quad (1)$$

missä

$U_{OC\ MAX}$ on aurinkopaneelin tyhjäkäyntijännite standardiolosuhteissa [V]

αU_{OC} on paneelin jännitteen lämpötilakerroin [%/°C]

T_{MIN} on asennuskohteen alin lämpötila [°C]

$U_{OC\ STC}$ on aurinkopaneelin nimellisjännite standardiolosuhteissa [V]

(Huom. Mikäli lämpötilatietoa ei voida hyödyntää on $U_{OC\ MAX}$ arvo tällöin $1,2 \cdot U_{OC\ STC}$)

Paneeliketjun enimmäispituutta rajoittavina tekijänä ovat vaihtosuuntaajan suurin sallittu tasajännite ja paneelin suurin sallittu tasajännite (Stapleton & Neill 2012 s.127) . Paneelille lasketun suureen $U_{OC\ MAX}$ avulla voidaan määrittää vaihtosuuntaajalle soveltuva paneeliketjun enimmäispituus $N_{MOD\ MAX}$ yhtälöllä 2

$$N_{MOD\ MAX} = \frac{U_{INV\ MAX}}{U_{OC\ MAX}} \quad (2)$$

missä

$U_{INV\ MAX}$ on vaihtosuuntaajan suurin sallittu sisääntulojännite

$N_{MOD\ MAX}$ on paneeliketjun suurin sallittu paneelimäärä

SFS-6000-712 liitteen B mukaisesti aurinkopaneelin suurimman oikosulkuvirran $I_{SC\ MAX}$ laskeminen on suoritettava yhtälöllä 3

$$I_{SC\ MAX} = K_I \cdot I_{SC\ STC} \quad (3)$$

missä

$I_{SC\ MAX}$ on aurinkopaneelin suurin oikosulkuvirta [A]

K_I on ympäristöolosuhteiden mukaan määräytyvä kerroin (> 1,25)

$I_{SC\ STC}$ on aurinkopaneelin nimellisvirta standardiolosuhteissa [A]

Tämän jälkeen oikosulkuvirran maksimiarvoa käyttämällä voidaan määrittää rinnakkain kytkettävien paneeliketjujen enimmäismäärä $N_{STR\ MAX}$ yhtälöllä 4

$$N_{STR\ MAX} = \frac{I_{SC\ INV\ MAX}}{I_{SC\ MAX}} \quad (4)$$

missä

$N_{STR\ MAX}$ on rinnakkainkytkettyjen paneeliketjujen maksimimäärä [A]

$I_{SC\ INV\ MAX}$ on vaihtosuuntaajan suurin sallittu tasavirta standardiolosuhteissa [A]

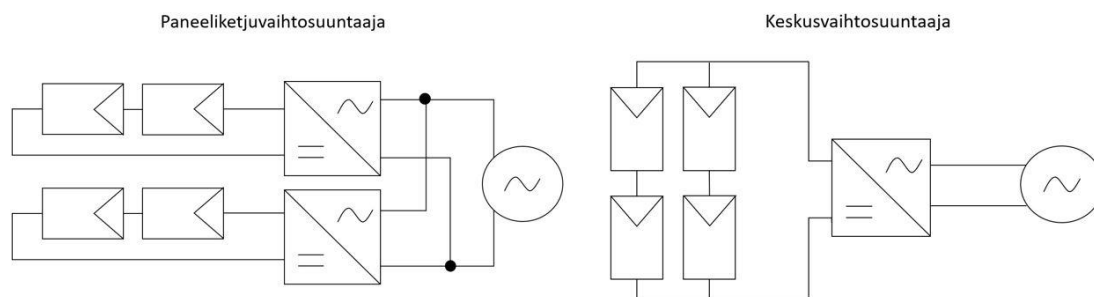
Suuren kokoluokan aurinkovoimalaa mitoitettaessa voi olla kannattavaa valita jännitekestoisuudeltaan suuremmat komponentit ja asettaa voimalan huipputasajännitteeksi 1500 V, jotta paneeliketjujen enimmäispituus saadaan kasvatettua huippuunsa. 1500 V järjestelmiä ei kannata toteuttaa pienessä mittakaavassa komponenttien korkeamman hinnan ja korkean jännitteen aiheuttamien lisävaatimusten vuoksi. Suuren kokoluokan järjestelmässä korkeamman jännitteen hyödyt kuitenkin ovat merkittävät, sillä korkeampi jännitetaso voi vähentää kaapeloinnin tarvetta jopa 15% - 85 % ja laskea kytkentäkoteloiden määrää 25 % - 60 %. (Gkoutioudi et. al. 2013)

5 VAIHTOSUUNTAAJA

Vaihtosuuntaajat sisältävät puolijohdekomponenteilla toteutettua tehoelektroniikkaa, jonka avulla aurinkopaneelien tasajännite muutetaan verkkoon sopivaksi vaihtojännitteeksi. Vaihtosuuntaajilla on myös muita tärkeitä ominaisuuksia. Vaihtosuuntaajan sisältämä MPP (maximum power point)- seurain hakee vaihtosuuntaajalle optimaalisen tehontuottopisteen. Lisäksi vaihtosuuntaajissa on erilaisia valvonta- ja turvallisuusominaisuuksia, joihin tulisi kuulua ainakin suojaus tasavirtakaapelin käänteiseltä napaisuudelta, ylivirta- ja ylijännitesuojaus, saarekekäytön esto sekä kaapelien eristysmittaus. (IFC s.35, 73)

Suuren kokoluokan järjestelmissä vaihtosuuntaajina voidaan käyttää keskusvaihtosuuntaajia tai paneeliketjukohtaisia vaihtosuuntaajia. Keskusvaihtosuuntaajalle kytketään suuri määrä paneeliketjuja rinnan, jolloin voimalan rakenne säilyy yksinkertaisena. (IFC s. 35) Tämä helpottaa merkittävästi järjestelmän kunnossapitoa ja vähentää tarvittavaa kaapelointia.

Paneeliketjukohtaisten vaihtosuuntaajien etuna on paneeliketjukohtainen MPP-säätö, minkä avulla ketjukohtainen tehontuotto saadaan maksimoitua. Tämä voi olla hyvä ratkaisu kohteissa, joissa paneeleita ei pystytä sijoittamaan samaan suuntaan tai joissa on merkittäviä varjostuksia. (IFC s. 35) Keskusvaihtosuuntaaja ja paneeliketjukohtainen vaihtosuuntaaja on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Keskusvaihtosuuntaaja ja paneeliketjukohtainen vaihtosuuntaaja (IFC 2015 s. 35)

5.1 Vaihtosuuntaajaa koskevat vaatimukset

Vaihtosuuntaajan on täytettävä Suomessa IEC 62109-1 ja IEC 62109-2 vaatimukset. Suuren kokoluokan järjestelmässä on lisäksi huomioitava IEC-62738 vaatimukset, kun kyseessä on järjestelmä, jossa maksimijännite on suurempi kuin 1000 V. (IEC -62548 s. 47)

Vaihtosuuntaajan valinnassa on otettava huomioon ympäristön aiheuttamat vaatimukset, kiinnittäen erityistä huomiota vesitiiviyyteen. Vaihtosuuntaajan tulee olla erotettavissa voimalan tasasähköpuolen navoista siten, että laite on mahdollista huoltaa vaarattomasti. Erotuskytkentä voidaan toteuttaa joko vaihtosuuntaajan ulkopuolella tai vaihtosuuntaajaan sisään rakennettuna. Erotuskytkin tulee sijoittaa siten, ettei sen käytöstä voi aiheutua

vaaraa. Mikäli vaihtosuuntaaja sisältää maavikojen valvontajärjestelmän, on sen kyettävä välittämään vikatieto sekä etänä, että paikallisesti (IEC-62548 s. 34, 39, 48).

Saarekekäytöllä tarkoitetaan sähkön tuottamista silloin, kun sähköverkossa ei ole virtaa. Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä saarekekäyttö voisi aiheuttaa merkittävää vaaraa esimerkiksi verkon korjaustöitä tekeville ihmisille, minkä vuoksi se on estettävä noudattaen standardia IEC-62116. Vaihtosuuntaajille on olemassa myös monia muita IEC-standardeja, jotka käsittelevät esimerkiksi sähkömagneettista yhteensopivuutta. (IFC 2015 s.39)

5.2 Vaihtosuuntaajan mitoittaminen

Aluksi on tärkeää tehdä päätös käytettävien vaihtosuuntaajien määrästä. Gevorkianin mukaan suuren kokoluokan aurinkovoimalan modularisointi on erityisen tärkeää voimalan luotettavuuden kannalta. Useampaa vaihtosuuntaajaa käytettäessä yhden invertterin vikaantuessa voimalan tuotantoa ei ole pakko keskeyttää kokonaan. (Gevorkian 2011 s. 131) Kohteesta riippuen voi siis olla viisasta tarkastella voimalan toteuttamista käyttämällä useampaa pienitehoista vaihtosuuntaajaa tai paneeliketjukohtaisia vaihtosuuntaajia.

Vaihtosuuntaaja tulee valita siten, että paneelientän maksimijännitteen arvo on sama tai pienempi, kuin vaihtosuuntaajaan sisääntulojännitteen maksimiarvo ja paneeliketjun minimitasajännitteen tulee olla suurempi kuin vaihtosuuntaajan käynnistymisjännite. (IFC 2015 s. 78) Myös vaihtosuuntaajalle tulevien virtojen raja-arvojen on oltava sopivat paneelientästä tuleville virroille. (Stapleton & Neill 2012 s. 125) Vaihtosuuntaajan valintaan vaikuttavat myös suuresti paneelien asennuskulma, ympäristön lämpötila ja auringon säteilytehon määrä. (IFC 2015 s. 77)

Vaihtosuuntaajan häviöiden minimoimiseksi vaihtosuuntaajan ja paneelientän tehojen tulisi olla mahdollisimman lähellä toisiaan (Stapleton & Neill 2012 s. 125) Tätä tehojen suhdetta voidaan arvioida laskemalla järjestelmälle vaihtosähkötehon ja tasasähkötehon suhdetta kuvaava tehokerroin, jonka tulisi yleensä olla noin 0.8 -1.2 (IFC 2015 s.77). Tehokerroin voidaan laskea yhtälöllä 5

$$\text{Tehokerroin} = \frac{P_{AC\ INV}}{P_{DC\ PV} \cdot \eta_{DC-AC\ INV}} \quad (5)$$

missä

$P_{AC\ INV}$ on vaihtosuuntaajan vaihtosähkö maksimiteho [W]

$P_{DC\ PV}$ on paneelientän tasasähköhuipputeho [W]

$\eta_{DC-AC\ INV}$ on vaihtosuuntaajan hyötysuhde [%]

Vaihtosuuntaajan valinnassa on myös huomioitava, että vaihtosuuntaajan hyötysuhde vaihtelee paneelientän tasajännitteen arvon mukaisesti. Tämän vuoksi myös vaihtosuuntaajakohtaisia riippuvuussuhteita jännitteen ja hyötysuhteen välillä tulisi tarkastella vaihtosuuntaajaa valitessa. (IFC, 2015 s. 77)

6 KAAPELOINTI

Aurinkosähköjärjestelmän kaapelointiin kuuluvat paneeliketjukaapelit, joilla paneelit yhdistetään ketjuiksi, ja joilla ketjut kytketään kytkentäkoteloon, sekä paneelistokaapelit, joilla kytkentäkotelo kytketään vaihtosuuntaajan sisääntuloon. Lisäksi järjestelmä sisältää myös maadoituskaapelit, joilla paneeliketjut kytketään maadoituskiskoon ja sen kautta maadoituselektrodiin. (Stapleton & Neill 2012 s. 72).

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä kaapelivedot ovat pitkiä, minkä vuoksi kaapeleissa tapahtuvat häviöt voivat olla suurempia kuin pienissä aurinkovoimaloissa. Häviöiden pienentämiseksi voi olla tarpeen käyttää isompia kaapeleita, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia. (IFC 2015 s.200)

Paneeliketjukaapeleina käytetään aurinkosähköjärjestelmiä varten suunniteltuja yksijohtimisia, kaksoiseristettyjä kaapeleita oikosulkuvikojen ehkäisemiseksi (IFC 2015 s. 79). Kaapelien johtimet on yleensä valmistettu joko kuparista tai alumiinista niiden kohtuullisen hinnan ja hyvän johtavuuden vuoksi (Stapleton & Neill 2012 s. 148).

Paneeliketjukaapelit asennetaan kiinteästi paikalleen joko kiinnittämällä ne telinerakenteisiin tai käyttämällä erillisiä kaapelikouruja. Kaapelien tulee olla suojattuna suoralta auringon valolta, vedeltä ja mekaaniselta kulumiselta. (IFC 2015 s. 78) Kaapelien suojaamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi tähän tarkoitukseen suunniteltua kanavaa tai putkea (Stapleton & Neill 2012 s. 150)

Paneelistokaapelit voidaan asentaa maan alle tai ojaan, kunhan noudatetaan tähän liittyviä paikallisia määräyksiä ja otetaan huomioon maaperän ominaisuudet (IFC 2015 s. 78). Kylmissä olosuhteissa tulee ottaa huomioon mahdollinen maan routiminen ja sen aiheuttamat rasitukset kaapeleihin sekä mahdollinen jään muodostuminen kanaviin.

6.1 Kaapelointia koskevat vaatimukset

Kaapelien valinnassa on tärkeää noudattaa sitä koskevia määräyksiä. 1500 V huippujännitteellä toimivien aurinkosähköjärjestelmien tasasähköosan kaapelointia koskevat erityisvaatimukset on määritelty standardissa IEC 62930:2017 Electric cables for photovoltaic systems with a voltage rating of 1,5 kV DC. Maatelineitä käytettäessä on noudatettava standardia IEC TS 62738:2018 Ground-mounted photovoltaic power plants - Design guidelines and recommendations. (IEC-62548 s. 7, 56)

Aurinkosähköjärjestelmissä on erityisen tärkeää, että kaapelit kestävät vallitsevia sääolosuhteita ja paneeliston aiheuttamaa lämpökuormaa. Standardin IEC 62548 mukaisesti kaapelit on suojattava UV-valolta asianmukaisilla johtokanavilla tai niiden on oltava UV-kestoisia. Lisäksi standardissa ohjeistetaan johdinsilmukoiden minimoiminen ilmastollisten ylijännitteiden riskin minimoimiseksi. (IEC 62548 s. 45, 54)

6.2 Kaapeleiden mitoittaminen

Kaapelien valinnassa on otettava huomioon kaapelille valmistajan määrittämä maksimijännite ja maksimivirta. Kaapelin maksimijännitteen on oltava suurempi, kuin yhtälöllä 1 laskettu tasasähköpuolen maksimijännite. Maksimivirran laskennassa on

huomioitava kaapelin asennustavalle, kaapelin pituudelle ja ympäristön lämpötilalle paikallisissa standardeissa määritellyt kertoimet. (IFC 2015 s. 78)

Kaapelien mitoituksessa on pyrittävä minimoimaan kaapeleissa tapahtuvat jännitehäviöt paikallisten standardien vaatimusten mukaisesti (IFC 2015 s. 78). Tämä tehdään valitsemalla sopiva kaapelin poikkipinta-ala ja johdinmateriaali, sekä minimoimalla kaapelivedon pituus. Jännitehäviön suhteellisen arvon yläraja vaihtelee standardeista riippuen 1 – 5 prosenttiyksikön välillä. (Stapleton & Neill 2012 s. 148) Jännitehäviön minimoiminen on yleensä ratkaiseva tekijä kaapelien valinnassa, minkä vuoksi kaapelipoikkipinta-alan tarkoituksellinen ylimitoittaminen voi olla joissain tilanteissa taloudellinen ratkaisu (IFC 2015 s. 78-79).

Kaapeleissa tapahtuva jännitteenalenema on varsinkin suuren järjestelmän pitkistä kaapelivedoista johtuen tärkein kaapelin poikkipinta-alan määrittelevä tekijä. Kaapelihäviöiden maksimirajat vaihtelevat riippuen standardeista. Usein käytetty yläraja jännitehäviölle on 3%. Kaapelissa tapahtuva jännitehäviö U_{LOSS} voidaan laskea yhtälöllä

$$U_{LOSS} = 2 * L * I_{SC MAX} * \frac{R}{A} \quad (6)$$

missä

U_{LOSS} kaapelissa tapahtuva jännitehäviö [V]

L on kaapelivedon pituus [m]

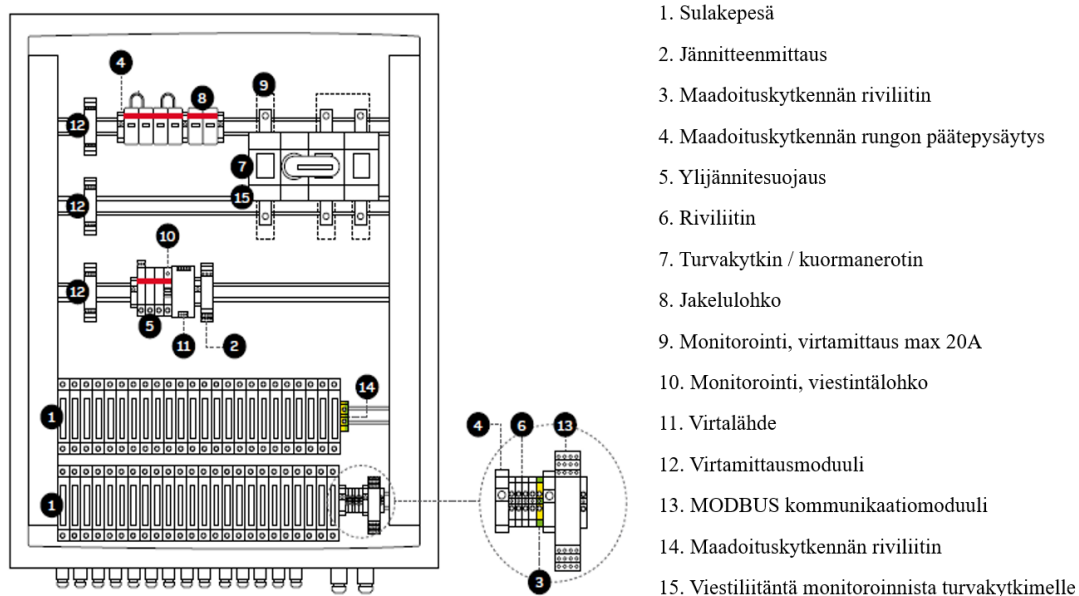
R on kaapelin vastus poikkipinta-alaa kohti [Ω/mm^2]

A on kaapelin poikkipinta-ala [mm^2]

7 SUOJALAITTEET JA KYTKENTÄKOTELOT

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä sähköturvallisuuden merkitys kasvaa huomattavasti tasavirtojen ollessa suuruusluokaltaan tuhansia ampeereja. Suojaus toteutetaan vaatimusten mukaisesti paneeliketjun, osapaneeliston ja koko voimalaitoksen tasolla. Tärkeimmät osa-alueet aurinkovoimalan suojauksessa ovat ylivirtasuojaus, ylijännitesuojaukset ja erottaminen. (IFC 2015 s. 80)

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmässä paneeliketjukohtaiset suojalaitteet on usein sijoitettu osapaneeliston kytkentäkoteloon. Kytchentäkotelo sisältää suojalaitteiden lisäksi myös maadoituskytkennän ja mahdollisesti myös tuotannon ja vikojen seurantaan liittyviä kytkentöjä. Kytchentäkotelon sulakepesät toimivat ylivirtasuojina ja samalla tarvittaessa paneeliketjukohtaisina erottimina. (IFC 2015 s. 79) Esimerkki kytkentäkotelosta ja sen sisältämistä laitteista on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. ABB:n kytkentäkotelon Stringbox DC 24str Monitor 1500V 1F 15A sisältämät komponentit. (ABB 2016 s.26)

Suuren kokoluokan aurinkovoimaloissa tärkeitä suojalaitteita on sisäänrakennettuna myös vaihtosuuntaajaan. Keskusvaihtosuuntaajat sisältävät useimmiten maadoitusvikojen ja verkon häiriöiden tarkkailujärjestelmän, saarekekäytön estojärjestelmän ja ylivirta- ja ylijännitesuojat. Lisäksi ne voivat sisältää tasasähkö- ja vaihtosähköpuolen erotuskytkimet. (ABB 2017)

7.1 Suojalaitteita koskevat vaatimukset

SFS-6000-7-712 mukaisesti paneeliston jokainen paneeliketju on suojattava molemmista navoista ylivirtasuojalla, mikäli paneelisto sisältää enemmän kuin kaksi paneeliketjua. Suojalaitteilla on oltava sama lämmönkestoisuus kuin aurinkopaneeleilla ja niiden tulee olla SFS-standardien mukaisia gPV-varokkeita, varokekytkimiä tai katkaisijoita. Suuren kokoluokan voimaloissa paneeliketjuja on aina useita rinnakkain, joten paneeliketjujen ylivirtasuojaus on välttämätöntä. (SFS-6000-7-712 s.11)

Mahdolliset vikavirrat osapaneelistossa riippuvat rinnankytkettyjen paneeliketjujen määrästä, vian sijainnista ja irradianssista vikahetkellä, minkä vuoksi oikosulkujen havaitseminen on haastavaa. Osapaneelistossa voi muodostua valokaaria vikavirroilla, jotka eivät ole riittäviä laukaisemaan ylivirtasuojaa. Tämän vuoksi aurinkosähköjärjestelmässä oikosulkujen, maavikojen ja virtapiirien katkaisemisen ehkäisemiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. (IEC 62548 s. 25)

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosa tulee voida erottaa vaihtosuuntaajasta asianmukaisilla erotuskytkimillä. Lisäksi voimalaan tulee tarvittaessa toteuttaa ylijännitesuojaus suojaamaan ukkosella indusoituvilta ylijännitteiltä ja kytkimistä aiheutuvilta jännitepiikeiltä. (IEC 62548 s. 39)

8 MAADOITTAMINEN

Aurinkovoimalan maadoituksella ehkäistään valokaarivikoja, tulipaloriskiä ja ukkosen aiheuttamaa riskiä. Maahan kytkettyyn aurinkosähköjärjestelmään ei pääse muodostumaan varausta ukkosella, mikä estää ilmastollisten ylijännitteiden syntyminen. Maadoittaminen käsittää paneeliston rungon maadoittamisen, tasavirtakaapelien maadoittamisen, vaihtosuuntaajan maadoittamisen ja salamasuojauksen. (IFC 2015 s. 83) Myös aurinkovoimalaa ympäröivä aita tulee maadoittaa, mikäli siihen voi indusoitua jännitteitä (Gevorkian 2014 s. 226)

8.1 Maadoitusta ja potentiaalintasausta koskevat vaatimukset

Aurinkosähköjärjestelmät tulee maadoittaa aina, kun voimalan jännitteen keskiarvo ylittää DCV-A-rajaa, joka on tasajännitteelle 60 V ja maadoitus on toteutettava vähintään 6 mm² poikkipinta-alaisella kuparijohtimella. Mikäli järjestelmään tarvitaan salamasuojaus, on johtojen poikkipinta-ala oltava vähintään 16 mm². (SFS-käsikirja 607 s. 46, 60) Suuren kokoluokan aurinkovoimalat on suuresta jännitetasosta johtuen maadoitettava poikkeuksetta. Ukkossuojauksen tarve ja muut maadoitusta koskevat vaatimukset on määritelty tarkemmin kansallisissa standardeissa. (IFC s. 84)

Potentiaalintasausta tehdään maadoittamisen yhteydessä ja sillä varmistetaan, että kaikki jännitteiset osat ovat samassa potentiaalissa. Pienjänniteasennusstandardin SFS-6000-7 mukaisesti kaikki aurinkosähköpaneeliston metalliset tukirakenteet ja johtotiet on liitettävä potentiaalintasaukseen. Alumiinisten osien tapauksessa on varmistettava kytkennän johtavuus käyttämällä asianmukaisia materiaaleja. Potentiaalintasaustajohtimet on asennettava tasasähkökaapelien kanssa rinnakkain indusoituvien jännitteiden ehkäisemiseksi. (SFS-6000-7-712 s. 16, 20)

Aurinkosähköjärjestelmän tasasähkökaapelien suojamaadoittaminen ei ole missään tilanteessa sallittua, mikäli järjestelmässä käytetään toiminnallista maadoitusta, on vaihtosuuntaajan tasasähkösisääntulon ja vaihtosähköulostulon välillä oltava vähintään yksinkertainen erotus. (IEC-62548 s. 17)

8.2 Maadoitustavan valinta ja mitoittaminen

Maadoitustavan valinta riippuu siitä tarvitseeko järjestelmässä toteuttaa toiminnallista maadoitusta, toiminnallisen maadoituksen impedanssi. Maadoitustapa ja maadoituspisteen sijainti ovat tärkeitä voimalan turvallisuuden kannalta. (IEC-62548 s. 17) Maadoitustapaan vaikuttavat merkittävästi myös paneelien ja vaihtosuuntaajan vaatimukset sekä salamaniskun todennäköisyys (IFC 2015 s. 84).

Lisäksi maadoituksen suunnittelussa on huomioitava asennustelineen tyyppi. Maadoituselektrodin, maadoitusliittimien ja muiden metallisten osien materiaalit tulisi valita siten, ettei osissa pääse tapahtumaan galvaanista korroosiota. (Charalambos et. al. 2014 s. 2) Esimerkkejä maadoitusosien valinnasta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Maadoituksessa käytettävät metallit maatelinytyypistä riippuen (Charalambos et.al. 2014 s.2)

Perustuksen tyyppi	Maadoitusjärjestelmän materiaali
Galvanoitu teräs upotettuna maahan	Galvanoitu teräs, ruostumaton teräs
Teräsprofiili betonijalan sisällä	Kuparipäälystetty teräs, kupari, ruostumaton teräs
Vahvistettu betonijalka maanpinnan yläpuolella	Galvanoitu teräs, kuparipäälystetty teräs, kupari, ruostumaton teräs
Vahvistettu betonijalka upotettuna maahan	Kuparipäälystetty teräs, kupari, ruostumaton teräs

8.3 Salamasuojaus

Salamasuojauksen tarve määritellään suorittamalla riskianalyysi. Riskianalyysissä tarkastellaan mahdollisia kohteeseen ukkosesta aiheutuvia vahinkoja ja sen suorittamisesta on annettu ohjeet esimerkiksi standardissa IEC-62305-2. Suuren kokoluokan aurinkovoimalassa salamaniskun aiheuttamat taloudelliset tappiot voivat olla merkittävät ja käytettävän suojauksen valinta saatetaan tehdä tältä pohjalta. (Charalambos et. al. 2013 s. 1)

Salamasuojauksen tehtävänä on ohjata salamasuojatun kohteen ohi turvallisesti maadoituselektrodille sieppausrakenteen avulla. Tämä voidaan toteuttaa joko eristetyllä tai eristämättömällä rakenteella tai niiden yhdistelmällä. Eristetyssä salamasuojauksessa suojaus toteutetaan ukkosenjohdattimella, joka on sijoitettu turvallisen ilmavälin päähän suojattavasta rakenteesta. Eristämättömässä suojauksessa ukkosenjohdatin on asennettu kiinteästi paneeliston telineeseen ja on siten liitetty suoraan voimalan maadoitusjärjestelmään. Suuren pinta-alan vuoksi voi olla tarpeen käyttää molempien suojaustapojen yhdistelmää, mikäli ukkosen aiheuttama riski on erityisen suuri. (Charalambos et. al. 2013 s. 4)

9 MUUNTAJA JA KYTKINLAITTEISTO

Suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmissä tarvitaan muuntajia jännitetason nostamiseksi sähköverkkoon sopivalle tasolle aurinkovoimalan ja verkkoliittymän välillä. Aurinkovoimala voi olla kytketty joko jakeluverkkoon tai suoraan siirtoverkkoon riippuen voimalan koosta. Siirtoverkkoon kytkettäessä tarvitaan jakelumuuntajan lisäksi päämuuntaja, jotta jännite saadaan nostettua tarpeeksi korkeaksi. (IFC 2015 s.73) Kuvassa 7 on esitetty ABB:n aurinkosähkökäyttöön tarkoitettu jakelumuuntaja.

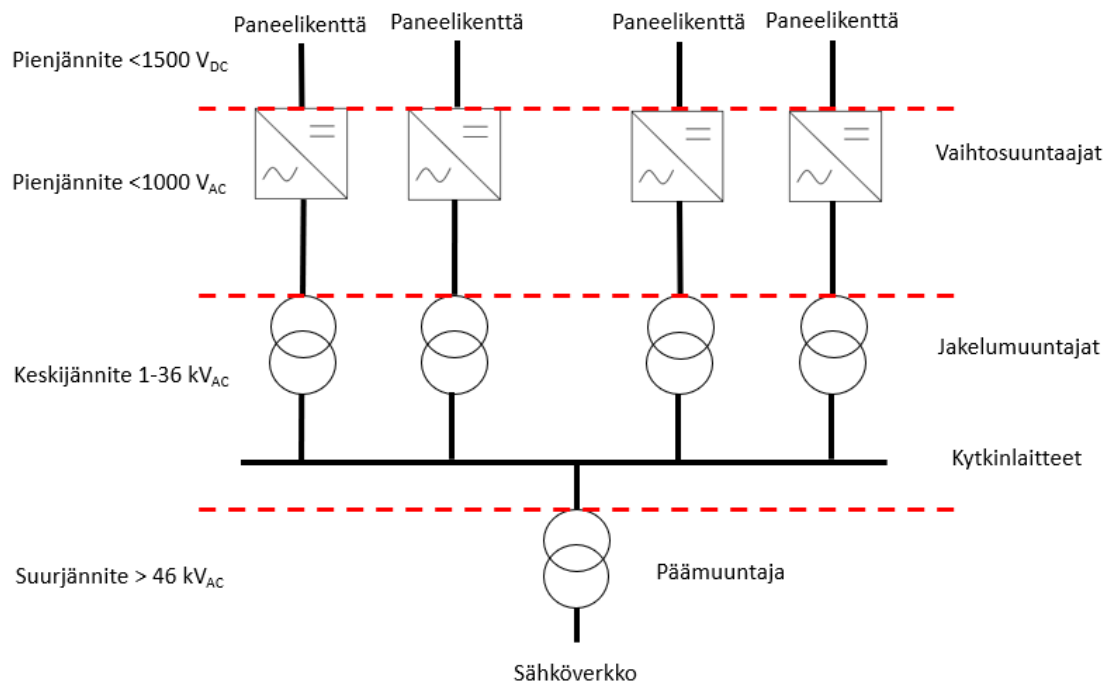


Kuva 7. Vasemmalta oikealle: kytkinlaitteisto, jakelumuuntaja ja keskusinvertteri (ABB 2017)

Muuntajien lisäksi suuren kokoluokan aurinkovoimala sisältää kytkinlaitteistot, suojalaitteet sekä valvonta- ja mittausjärjestelmän. Kytkentälaitteina käytetään erilaisia katkaisijoita verkonjännitetasosta riippuen ja niiden tehtävä on erottaa voimalaitos tarvittaessa verkosta. Verkkoon syötetyn energian määrää tarkkaillaan tariffimittauksella, joka voidaan sijoittaa sähköasemaan. Energiamittauksen lisäksi sähköasemalla on kattava monitorointijärjestelmä, jolla tarkkaillaan voimalan tilaa. (IFC 2015 s. 82)

9.1 Muuntajien valinta ja mitoittaminen

Aurinkovoimalan muuntajat mitoitetaan verkkoliittymän ja aurinkovoimalan invertterin tuottaman jännitteen perusteella. Yleensä invertterit tuottavat pienoishännitettä, kun taas verkon puolella jännite on voi olla kilovoltin tai satojen kilovolttien luokkaa liittytäpisteestä riippuen. Mitoituksessa on pyrittävä minimoimaan muuntajassa tapahtuvat häviöt ja lisäksi on huomioitava muuntajan kapasiteetti, ympäristön vaikutukset ja sähköjärjestelmän ja verkon ominaisuudet. (IFC 2015 s.82) Esimerkki muuntajien ja kytkentälaitteiston jännitetasoista on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Muuntajien ja kytkentälaitteiston jännitetasot (IFC 2015 s. 82)

9.2 Muuntajia koskevat vaatimukset

Verkkoliitynnän suunnittelussa tulee ottaa huomioon sähkömagneettista yhteensopivuutta, jännitteen ja taajuuden vaihtelua ja loistehoa koskevat vaatimukset sekä vikatilanteita ja suojausta koskevat vaatimukset. Nämä vaatimukset ovat yleensä verkkoyhtiön määrittelemiä ja vaihtelevat siten verkkoyhtiöstä riippuen. (IFC 2015 s.84)

Muuntajan valinnassa ja mitoituksessa tulee noudattaa standardissa IEC 60076 asetettuja vaatimuksia. Vaatimukset koskevat pääasiassa muuntajassa tapahtuvia kupari- ja rautahäviöitä ja muuntajien tyyppitestausta. (IFC 2015 s. 83)

10 VERTAILU PIENEN KOKOLUOKAN JÄRJESTELMIIN

Pienen kokoluokan verkkoon kytketyllä aurinkosähköjärjestelmällä tarkoitetaan yleisesti kW-kokoluokan aurinkovoimalaa. Nämä voimalat asennetaan usein rakennusten katoille tai maa-asennustelineellä rakennuksen läheisyyteen. Vaikka laitteiden toimintaperiaatteet ovat samoja ja tasasähköpuolella käytetään suunnittelussa pääosin samoja standardeja ja periaatteita, on eri suuruusluokkien voimaloiden suunnittelussa myös kokoluokasta aiheutuvia eroja. (IFC 2015 s. 195-201)

Pienet aurinkosähköjärjestelmät toimivat ainoastaan pienjännitetasolla, joten ne eivät tarvitse erillistä muuntajaa tai kytkentälaitteistoa verkkokytkentää varten. Sen sijaan kytkentä tapahtuu kytkemällä vaihtosuuntaaja rakennuksen pääkeskukseen, jolloin erottaminen verkosta hoidetaan erotuskytkimillä. Vaihtosuuntaajat sisältävät kuitenkin aina saarekekäytön eston samalla tavalla kuin suuremmissa järjestelmissä ja voivat sisältää myös muita turvallisuusominaisuuksia. (IFC 2015 s. 195-201)

Aurinkopaneelien osalta merkittäviä sähköteknisiä eroja laitteistoissa ei ole. Ainoastaan 1500 V jännitekestoisuus ja sen aiheuttamat lisävaatimukset erottavat näiden laitteiden valinnan ja mitoittamisen pienen sähköjärjestelmän suunnittelun toimenpiteistä. (IFC 2015 s. 195-201)

Suuren kokoluokan järjestelmässä käytetään usein paksumpia kaapeleita paneelistokaapeleina ja voimalan pääkaapeleina, mikä voi vaikuttaa kaapeloinnin asennustapojen suunnitteluun. Tämän lisäksi kaapeloinnin suunnittelussa on huomioitava voimalan suuren pinta-alan vaikutukset kaapelivetojen pituuksiin, jotta jännitehäviöt eivät kasva suuriksi. Myös kytkentäkoteloiden käytöllä voidaan suurissa järjestelmissä vähentää kaapelointia. (IFC 2015)

Suojalaitteiden ja maadoituksen osalta pienen kokoluokan järjestelmät eivät juurikaan poikkea suuremmista järjestelmistä. Kuitenkin on huomioitava, että pienen kokoluokan aurinkosähköjärjestelmät asennetaan usein rakennusten katoille, jolloin erillistä maadoitusta ei tarvita, vaan maadoitettavat osat liitetään kaapelilla rakennuksen maadoituskiskoon. Lisäksi voimalan pienen pinta-alan ja alhaisen salamaniskuriskin takia salamasuojaus voidaan usein jättää pienissä järjestelmissä toteuttamatta. (IFC 2015 s. 195-201)

11 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä perehdyttiin suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän komponentteihin ja niiden mitoittamiseen ja tarkasteltiin suunnitteluun liittyviä vaatimuksia. Samalla tutkittiin, mitä merkittäviä muutoksia voimalan suuri kokoluokka aiheuttaa aurinkosähköjärjestelmän laitevalintoihin ja suunnitteluun. Vaatimusten tarkastelu jäi aiottua pintapuolisemmaksi standardidokumenttien heikon saatavuuden vuoksi.

Merkittävimmiten eroiksi suuren kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän laitteissa pienempiin voimaloihin verrattuna voidaan todeta muuntajat, kytkentälaitteisto ja osapaneelistojen kytkentäkotelot. Lisäksi suuren kokoluokan aurinkovoimalan suunnittelussa on huomioitava suuritehoisten keskusinvertterien käyttö, komponenttien korkeampi huippujännitetaso sekä tuotannon ja vikojen seurantaan liittyvät erityispiirteet.

Suuressa järjestelmässä aurinkopaneelikenttien ison pinta-alan vuoksi kaapelivedot ovat pitkiä. Tämä on huomioitava mitoitettaessa kaapeleiden poikkipinta-aloja, etteivät jännitehäviöt pääse kasvamaan liian suuriksi. Lisäksi paneelikentän pinta-ala ja suuret kustannukset voivat lisätä merkittävästi salamaniskun riskiä, jolloin salamasuojauksen tarve ja toteutusvaihtoehdot tulee tarkastella aina tapauskohtaisesti.

Sähköisten komponenttien mitoittamisessa noudatetaan pääosin samoja periaatteita aurinkovoimalan kokoluokasta riippumatta. Suuren kokoluokan voimalan sähkösuunnittelussa on kuitenkin huomioitava suurikokoisille voimaloille asetetut erityisvaatimukset, joita käsittelevät muun muassa standardit IEC TS 62738:2018 ja IEC 62930:2017. Merkittäviä vaatimuksia ovat varsinkin aurinkovoimalan alueen rajaamiseen ja turvallisuuden takaamiseen liittyvät kohdat.

Lopuksi voidaan todeta, että aurinkosähkön etuna on, että samoja teknologioita voidaan hyödyntää hyvin pitkälle aurinkovoimalan kokoluokasta riippumatta. Laitteiden toimintaperiaatteet ovat pääosin samankaltaisia sekä pienissä, että suuremmissa voimaloissa ja merkittävät erot sähkösuunnittelussa liittyvät tiukempiin turvallisuusvaatimukseen. Lisäksi suuren kokoluokan järjestelmissä vaaditaan sähkövoimatekniikan osaamista verkkoliitynnän ja muuntajan osalta.

LÄHDELUETTELO

ABB 2017, ABB central inverters PVS980 -1818 to 2091 kVA Saatavilla:

<https://www.infobuildenergia.it/Allegati/11066.pdf> [Viitattu 16.12.2018]

ABB 2016, ABB String combiners for solar photovoltaic systems, A plug & play solution for photovoltaic solar installations, Saatavilla:

https://library.e.abb.com/public/fc568ed61504473986488daf1313e451/CT_combiner-AU_9AKK106930A8804.pdf [Viitattu 16.12.2018]

Boxwell, Michael 2014, Solar Electricity Handbook: a Simple Practical Guide to Solar Energy: Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems, ISBN 978-1-907670-39-8

Bruno, Erat. 2016, Aurinkoenergiaa Suomessa ISBN: 9789522646637

Charalambos, Kokkinos, Christofides, 2013, External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications Print ISSN: 0018-9375

Gevorkian, Peter 2011, Large-Scale Solar Power System Design, ISBN: 978-0-07-176327-1

Gkoutioudi et. al. 2013, Comparison of PV systems with maximum DC voltage 1000V and 1500V Electronic ISBN: 978-1-4799-3299-3

IEC-62548: Photovoltaic (PV) arrays – Design requirements

IFC 2015, Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants, Saatavilla:

https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f05d3e00498e0841bb6fbb54d141794/IFC+Solar+Report_Web+_08+05.pdf?MOD=AJPERES [Viitattu 16.12.2018]

Power Technology 2018, The Worlds Biggest Solar Power Plants, Saatavilla:

<https://www.power-technology.com/features/the-worlds-biggest-solar-power-plants/> [Viitattu 10.12.2018]

SFS-käsikirja 607: Aurinkosähköjärjestelmät ISBN-13: 9789522423252

SFS-6000 2017: Pienjännitesähköasennukset

Stapleton & Neill, 2012, Grid Connected Solar Electric Systems ISBN 978-1-84971-344-3