

Henri Mäenpää

**ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS TEOLLISEN AURINKOVOIMAN
SÄHKÖNTUOTANTOON**

ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS TEOLLISEN AURINKOVOIMAN SÄHKÖNTUOTANTOON

Henri Mäenpää
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t): Henri Mäenpää

Opinnäytetyön nimi: Erilaisten inverttereiden vaikutus teollisen aurinkovoiman sähköntuotantoon

Työn ohjaaja(t): Hannu Sarkkinen

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Syksy 2023

Sivumäärä: 53

Tämän opinnäytetyön aiheena oli vertailla erilaisten inverttereiden vaikutusta teollisen aurinkovoiman sähköntuotantoon. Vertailua suoritettiin inverttereiden tehohäviöiden kautta, jotta vertailusta saadaan suhteellisen selkeä. Inverttereiden hintaerot on otettu huomioon lopputuloksia käsiteltäessä. Inverttereiden vertailu suoritettiin käyttämällä eri kokoisia kuvitteellisia aurinkosähköjärjestelmiä. Käytettyjä kuvitteellisia aurinkosähköjärjestelmiä oli yhteensä viisi, joille suoritettiin vertailu sekä ylimitoituksella että ilman ylimitoitusta.

Työn toimeksiantaja oli Sitema Oy, joka tekee suunnittelu- ja asiantuntijatyötä aurinkovoimahankkeiden parissa suomalaisille ja ulkomaalaisille yrityksille. Toimeksiantaja koki tarpeelliseksi erilaisten inverttereiden vertailun, koska aurinkovoiman käytön lisääntyessä on tärkeää, että käytössä ovat oikeanlaiset invertterit. Oikeanlaisella invertterillä ja mahdollisella virran optimoijalla saavutetaan tehokas ja pitkäikäinen järjestelmä.

Inverttereiden tärkein tehtävä on muuntaa aurinkopaneelien tuottama tasavirta käyttökelpoiseksi vaihtovirraksi. Tällä hetkellä yleisin Suomessa käytettävä invertteri on stringi-invertteri, joka voi olla 1- tai 3-vaiheinen. Stringi-inverttereiden lisäksi tässä työssä on käsitelty keskusinverttereitä, mikroinverttereitä, hybridi-inverttereitä sekä hiukan teho optimoijia. Nimensä mukaisesti 1-vaiheinen invertteri on kytketty verkon yhteen vaiheeseen ja 3-vaiheinen verkon jokaiseen kolmeen vaiheeseen. Useimmat invertterit ovat nykyään 3-vaiheisia, koska useimmissa tilanteissa niiden avulla saavutetaan parempi hyöty. 1-vaiheiset invertterit ovat pääosin käytössä alle 3 kWp järjestelmissä sekä sellaisissa talouksissa, missä on 1-vaiheinen sähköliittymä. 1-vaiheinen invertteri on pakollinen 1-vaiheisissa sähköliittymissä.

Vertailuita tehdessä huomattiin, että korkeammilla jännitteillä stringi-invertterit ovat paras vaihtoehto sekä teollisissa kiinteistöissä että aurinkopuistoissa. 50 kW teollisissa kiinteistöissä matalammilla jännitteillä hybridi-invertterit ovat hyvä vaihtoehto, mutta aurinkosähköjärjestelmän koon noustessa yli 100 kW on järkevintä käyttää stringi-invertteriä halvempien kulujen vuoksi. Aurinkopuistoissa keskusinvertterit ovat tehohäviöllisesti parempia kuin stringi-invertterit, kun aurinkosähköjärjestelmän jännite on alle 1050–1100 V, riippuen inverttereiden mitoituksista. Aurinkopuistojen kohdalla täytyy myös miettiä invertteriä valitessa erilaiset olosuhteet, kuten esimerkiksi varjostukset. Toinen invertteri voi siis olla tehohäviöllisesti parempi vaihtoehto, mutta aurinkopuiston olosuhteiden takia on siitä huolimatta järkevää käyttää muuta invertteriä.

Asiasanat: Invertteri, tehohäviöt, hajautettu aurinkosähköjärjestelmä, keskitetty aurinkosähköjärjestelmä

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in energy technology

Author(s): Henri Mäenpää

Title of thesis: The impact of different inverters on industrial solar power generation

Supervisor(s): Hannu Sarkkinen

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2023

Number of pages: 53

The subject of this thesis was to compare the impact of different inverters on industrial solar power generation. The comparison was made using inverters power losses. The costs of the inverters are taken into account when processing the final results. The comparison was done using different sized fictitious photovoltaic systems. There were a total of five fictitious solar power systems.

This thesis was made for Sitema Oy, who does planning and expert work on solar power projects for Finnish and foreign companies. They wanted to know the impact of different inverters, because the use of solar power is increasing rapidly and inverters are a big part of the photovoltaic systems. Efficient and long-lasting system is achieved with the right type of inverter and possible power optimizer.

The most important thing for inverters is to convert the direct current produced by the solar panels into usable alternating current. Currently the most common inverter in Finland is string inverter, which can be 1- or 3-phase. In addition to string inverters, central inverters, microinverters, hybrid inverters and some power optimizers have been discussed in this work. Most inverters today are 3-phase, because in most situations they achieve a better benefit. 1-phase inverters are mainly used in systems below 3 kWp and in households with a 1-phase electricity connection. 1-phase inverter is mandatory in 1-phase electrical connections.

When making comparisons, it was noticed that at higher voltages, string inverters are the best alternative for both industrial properties and photovoltaic power stations. In 50 kW industrial properties with lower voltages, hybrid inverters are a good option. But when the size of the solar power system increases above 100 kW, it makes the most sense to use a string inverter due to cheaper costs. In photovoltaic power stations, central inverters are better than string inverters in terms of power losses, when the voltage of the photovoltaic system is below 1050–1100 V. In the case of photovoltaic power stations, you also have to think about different conditions when choosing an inverter, such as shading, for example. The second inverter may be a better option in terms of power losses, but due to the conditions of the photovoltaic power station, it's nevertheless reasonable to use another inverter.

Keywords: inverter, power losses, distributed solar power system, centralized solar power system

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	7
2.1	Verkkoon kytketyt aurinkojärjestelmät	8
2.2	Verkon ulkopuoliset ja erilliset aurinkosähköjärjestelmät.....	10
3	INVERTTEREISTÄ.....	12
3.1	Keskusinvertteri.....	14
3.2	Stringi-invertteri	14
3.3	Mikroinvertteri.....	15
3.4	Hybridi-invertteri	15
3.5	Virran optimoija	16
4	ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS TEOLLISTEN KIIINTEISTÖJEN AURINKOVOIMAN TUOTANTOON	17
4.1	50 kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta	20
4.2	100kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta	22
4.3	500 kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta	26
4.4	50 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella	30
4.5	100 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella	32
4.6	500 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella	36
5	ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS AURINKOPUISTOJEN AURINKOSÄHKÖN TUOTANTOON.....	40
5.1	10MW aurinkosähköjärjestelmä	42
5.2	100 MW aurinkosähköjärjestelmä	46
6	TULOKSET JA YHTEENVETO	50
	LÄHTEET.....	52

1 JOHDANTO

Aurinkovoiman käyttö lisääntyy kovaa vauhtia sekä teollisessa että yksityisessä käytössä. Erilaisia aurinkopuistoja rakennetaan yhä enemmän ja enemmän ja pienempien aurinkosähköjärjestelmien rakentaminen asuin- ja liikerakennusten katoille lisääntyy kovaa vauhtia. Invertterit ovat olennainen osa aurinkosähköjärjestelmää, minkä vuoksi on tärkeää, että voimalassa on käytössä siihen parhaiten sopiva invertteri. Oikeanlaisella invertterillä ja mahdollisella virran optimoijalla saavutetaan tehokas ja pitkäikäinen järjestelmä. Invertterit ja virran optimoijat etsivät jatkuvasti Maximum Point Tracking Systemin eli MPPT:n avulla kohtaa, missä aurinkopaneelit tuottavat parhaiten virtaa, jotta aurinkovoimalan hyötysuhde saataisiin maksimoitua. Inverttereiden tehtävänä aurinkosähköjärjestelmässä on muuntaa aurinkopaneelien tuottama tasavirta käyttökelpoiseksi vaihtovirraksi, jota siten voidaan käyttää itse tai johtaa sähköverkkoon muiden käytettäväksi. Tällä hetkellä yleisin invertteri Suomessa ja maailmalla on stringi-invertteri, jota on saatavilla sekä 1- että 3-vaiheisena. Muita käytettyjä inverttereitä ovat muun muassa keskusinvertterit, mikroinvertterit sekä hybridiinvertterit. Hybridi-invertterit ovat uudempaa teknologiaa, jotka soveltuvat paremmin hiukan pienempiin käyttökohteisiin eivätkä ole vielä kovin yleisiä.

Tämän opinnäytetyön aiheena on vertailla erilaisten inverttereiden vaikutusta teollisen aurinkovoiman sähköntuotantoon. Vertailulla halutaan selvittää, minkälainen invertteri on paras vaihtoehto eri kokoluokan aurinkovoimaloissa, jotta tuotanto olisi tehokkainta. Tässä työssä vertailua tehdään pääosin teknisestä näkökulmasta.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Sitema Oy, joka on vuonna 2018 perustettu energiainfran suunnittelu- ja asiantuntijapalveluita tarjoava yritys. Sitema Oy tekee suunnittelu- ja asiantuntijatyötä aurinkovoimahankkeiden parissa suomalaisille ja ulkomaalaisille yrityksille. Koska aurinkovoiman käyttö lisääntyy koko ajan, on invertteriteknologian vertailu tärkeää tulevaisuuden suunnittelu- ja asiantuntijapalveluita varten. Tässä työssä inverttereiden vertailu toteutetaan käyttäen avoimia kirjallisia lähteitä sekä teknologisia tutkimuksia aiheesta. Lopputulokset ja päätelmät esitetään kirjallisesti ja kuvien avulla.

2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä on olemassa todella paljon. Aurinkosähköjärjestelmä voi olla pienimmillään vain kymmenien wattien kokoinen mökkisovellus ja suurimmillaan tuhansien megawattien kokoinen aurinkovoimala. Aurinkosähköjärjestelmässä on yleensä kaksi pääkomponenttia, aurinkopaneelit sekä 1- tai 3-vaiheinen invertteri eli vaihtosuuntaaja (1.) Lisäksi aurinkosähköjärjestelmään kuuluu aurinkopaneelien kiinnitysjärjestelmä, sähköjärjestelmät ja mittarit sekä joissain tapauksissa akku. Jos järjestelmä kytketään verkkoon, tarvitaan lisäksi mittaus- ja suojalaitteet sekä mahdollisesti verkkojännitemuuntaja (2.)

Aurinkosähköjärjestelmän tärkein komponentti on aurinkopaneelit, joiden toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön (2). Valosähköisessä ilmiössä auringon säteilyn fotonit imeytyvät aurinkopaneeliin osuessaan siihen ja vapauttavat elektroneja. Tämän jälkeen vapautuneet elektronit pääsevät virtaamaan vapaasti aurinkopaneelissa ja muodostavat sähkövirtaa virtajohtimiin. Syntynyt sähkövirta johdetaan kaapelilla invertterille muunnettavaksi. (3.) Yleensä Suomessa paneelit valmistetaan yksi- tai monikiteisestä piistä, joka kestää hyvin rajutkin olosuhteet, ja arviolta noin 90 % tarjolla olevista paneeleista onkin piikidepaneeleita (2).

Tyypillinen kiinteistöissä käytettävä paneeli on kooltaan noin 1 m x 1,6 m, kaupallisissa ja liiketoiminnallisissa kohteissa koko on noin 1 m x 2 m. Aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista, jotka on kytketty paneelissa yleensä sarjaan, mutta joissain tapauksissa voidaan käyttää myös rinnan kytkentää. Rinnan kytkentä on kuitenkin harvinaista. Aurinkopaneeleita on montaa eri tyyppiä ja kokoa, mutta niin sanottu kiinteistöpaneeli on niistä käytetyin. (3.) Näissä paneeleissa jännite on 20–40 volttia, yhden aurinkokennon jännitteen ollessa noin 0,5 volttia. Yleisin kiinteistöissä käytettävä paneeli sisältää 60 aurinkokennoa, liiketoiminnallisissa kennoissa määrä on 72. (4.) Aurinkopaneeleissa voi olla 32–96 kennoa, mutta leikatuissa solupaneeleissa määrä voi olla jopa 120–144 (5). Tällä hetkellä aurinkopaneelien hyötysuhde on noin 20 %. Laboratorio-olosuhteissa on päästy lähelle 50 % hyötysuhdetta, mutta se ei ole saavutettavissa normaaleissa käyttöolosuhteissa. (3.)

Aurinkosähkötekniikan aurinkopaneelit voidaan jaotella kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeleita ovat yksi- ja monikiteiset piikidepaneeelit, jotka ovat yleisimpiä aurinkopaneeleita. Toisen sukupolven aurinkopaneeleita ovat ohutkalvoaurinkopaneelit, joiden toiminta-

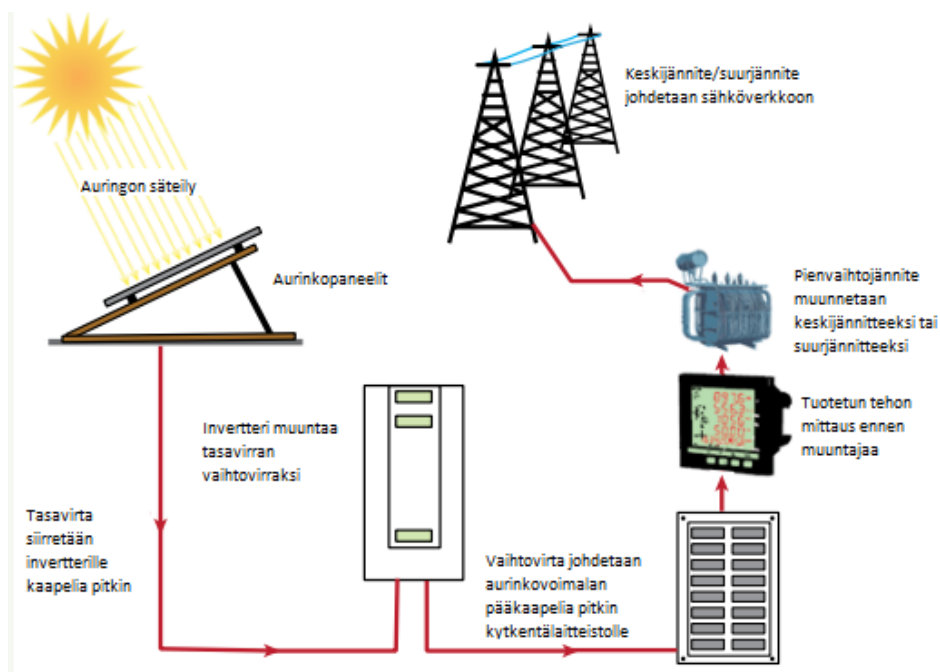
periaate perustuu yksi- ja monikiteisten piikidepaneelien tapaan valosähköiseen ilmiöön ja puoli-johteiden pn-liitoksen tuottamaan sähkökenttään. Kolmannen sukupolven aurinkopaneelit eivät ole vielä markkinoilla, vaan ne ovat vasta tutkimus- ja kehitysvaiheessa. Tämän sukupolven tuotteita tulevat olemaan esimerkiksi nanokidepaneelit, joiden toiminta eroaa hiukan aikaisemman sukupolven aurinkopaneeleista. Nanokidepaneelissa ei ole ensimmäisen ja toisen sukupolven tapaan pn-liitoksen aikaansaamaa sähkökenttää, vaan elektronien liike johtuu erilaisista kemiallisista reaktioista. Nanokidepaneelien lisäksi kehitteillä on esimerkiksi keskitettäviin järjestelmiin kehitettyjä aurinkopaneeleita sekä joustavia aurinkopaneeleita, joiden sovelluksia löytyy jo käytöstä maailmalla. (2.)

Toinen aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentti on yleensä invertteri. On olemassa joitakin verkon ulkopuolisia järjestelmiä, jotka toimivat ilman invertteriä. Kuitenkin suurimmassa osassa järjestelmiä on käytössä invertteri. Invertterin lisäksi järjestelmässä voi olla virran optimoija, joka pyrkii lisäämään järjestelmän tehokkuutta MPPT:n avulla. Invertterit voivat olla 1- tai 3-vaiheisia, eli ne voidaan kytkeä verkon yhteen vaiheeseen tai kaikkiin kolmeen vaiheeseen. Näistä suositumpi vaihtoehto on 3-vaiheinen kytkentä, koska niiden avulla saadaan normaalitilanteissa suurin hyöty. 1-vaiheiset invertterit ovat pääosin käytössä erilaisissa pienissä järjestelmissä sekä 1-vaiheiliitymissä, missä täytyy käyttää 1-vaiheista invertteriä. (2.) Invertterin tärkein ominaisuus on muuntaa aurinkopaneelien tuottama sähkövirta verkkosähköksi turvallisesti ja hyvällä hyötysuhteella. Lisäksi invertterin sekä sen käytön tulisi olla edullista ja helppoa. Yleisin invertteri Suomessa ja maailmalla on stringi-invertteri, joka voidaan kytkeä 1- tai 3-vaiheisena. Muita käytössä olevia inverttereitä on muun muassa tässä työssä käsiteltävät keskusinvertteri, mikroinvertteri sekä hybridi-invertteri. (6.)

2.1 Verkkoon kytketyt aurinkojärjestelmät

Verkkoon kytkettyjen aurinkojärjestelmien kokoluokat ja jännitetasot vaihtelevat kohteen mukaan. Nämä kaikki järjestelmät kuitenkin sisältävät samat komponentit sekä samanlaisen tavan tuottaa sähköenergiaa, joka siirretään yhteiseen käyttöön koko verkostolle. Verkkoon kytketyssä aurinkosähköjärjestelmässä auringon säde aiheuttaa aurinkopaneelissa valosähköisen ilmiön, joka vapauttaa elektronit atomeista. Elektronien vapaa liikkuminen saa aurinkopaneelin tuottamaan tasaista sähkövirtaa, joka siirretään aurinkopaneelilta kaapelia pitkin invertterille. Invertterillä tasavirta muunnetaan käyttökelpoiseksi vaihtovirraksi, jota voidaan ottaa sekä omaan käyttöön että johtaa sähköverkkoon muiden käytettäväksi. Invertterin tuottaman vaihtosähkön jännite ei ole aina

yhteensopiva verkkojännitteen kanssa, jolloin tarvitaan step-up-muuntajaa. Step-up-muuntaja muuntaa invertteriltä tulleen vaihtovirran liian alhaisen jännitteen tarvittavaksi verkkojännitteeksi. Kun vaihtovirran jännite on oikea, voidaan se kohteesta ja tilanteesta riippuen johtaa kaapelia pitkin sähköasemalle, siirtää suoraan verkkoon nettomittarin läpi tai käyttää itse omiin tarpeisiin. Mikäli sähkövirta siirretään sähköasemalle, siirtyy se kaapelia pitkin kytkentä- ja mittaustarvikkeille. Näillä laitteilla sähkövirta tarkistetaan sekä sen teho mitataan ennen muuntajaa. Muuntajalla pienjännite muunnetaan keski- tai suurjännitteeksi ja siirretään sähköverkkoon. (Kuva 1.)(7.)



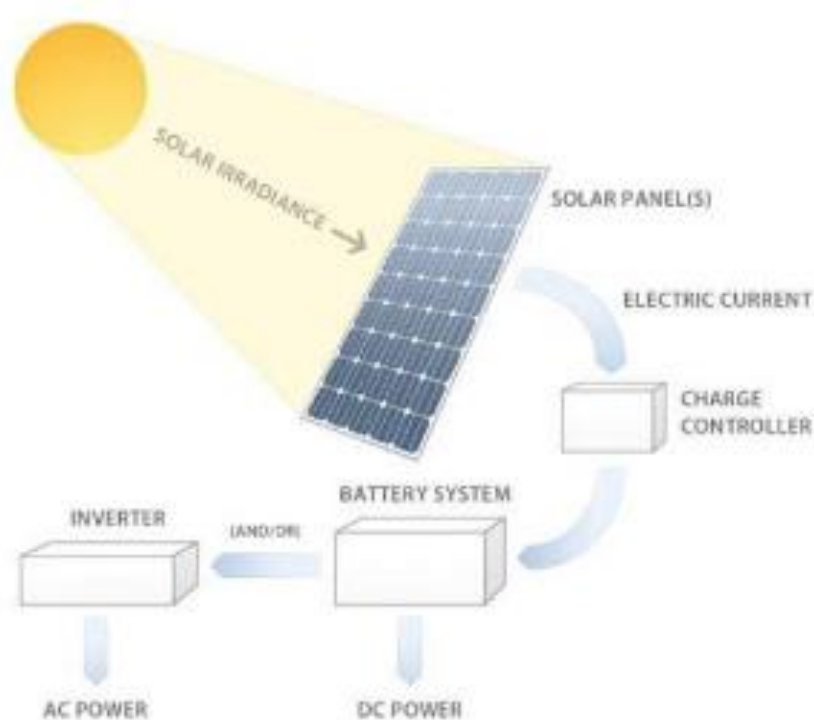
KUVA 1. Esimerkki yleisestä aurinkosähkövoimalaitoksesta (7)

Verkkoon kytkettyjä aurinkojärjestelmiä löytyy usein kaupunkialueilta, missä on verkkovirtaa helposti saatavilla. Näissä järjestelmissä tuotettua sähköä ei varastoida akkuihin, vaan ylimääräinen sähkö siirretään takaisin verkkoon, joka toimii samalla eräänlaisena varastona. Tämä on yksi verkkoon kytketyn aurinkojärjestelmän hyödyistä, koska omistaja voi itse päättää oman järjestelmän koon. Omistaja voi tuottaa tontin sähkön kokonaan itse, ottaa kaiken tarvitsemansa sähkön verkosta tai käyttää yhdistelmää molemmista. Kun käytetään yhdistelmää molemmista, tuotetaan tietty osuus itse ja otetaan loput verkosta. Mikäli omistaja tuottaa ylimääräistä sähköä verkkoon, saa hän siitä rahallisen korvauksen. Yleensä ylimääräistä sähköä tuottavat asuinjärjestelmät, jossa ylimääräinen sähkö syötetään lähirakennuksiin. Monien isompien rakennusten kuten kauppakeskusten ja tehtaiden tuottama sähkö kuluu rakennuksen omaan kuormitukseen, jolloin ylimääräistä sähköä ei jää myytäväksi. (8.)

Verkkoon kytketty aurinkovoimala voi sijaita myös syrjäisemmällä alueella. Osa näistä aurinkovoimaloista on hybridivoimaloita, jotka käyttävät aurinkoenergian lisäksi useita eri polttoaineita kuten hiiltä, kaasua, vettä sekä dieseliä ja ne ovat suoraan yhteydessä keskusverkkoon. Näissä aurinkovoimaloissa tuotettu sähkö siirtyy suoraan jakelujärjestelmää pitkin loppukäyttäjille kuten tehtaille ja koteihin. (8.)

2.2 Verkon ulkopuoliset ja erilliset aurinkosähköjärjestelmät

Verkon ulkopuolisen tai erillisen aurinkosähköjärjestelmän tarkoituksena on korvata tai täydentää pääasiallista verkkovirtalähdettä. Tällaiset järjestelmäratkaisut ovat pääosin käytössä maaseudulla sekä syrjäisemmillä seuduilla, missä verkkovirtaa ei ole saatavilla verkon laajennuksen korkean hinnan takia. Näissä järjestelmissä akut ladataan aurinkoenergialla, mitkä sitten varastoivat virtaa seuraavaan käyttökertaan. Akkujen virtaa käytetään erilaisten laitteiden toimintaan, kuten esimerkiksi pumppuihin, valaistukseen sekä erilaisiin kodinkoneisiin. Laitteita voidaan ohjata joko suoraan akuista pienjännitelaitteena, jolloin käytössä on tasavirta, tai käyttämällä invertteriä, joka muuntaa akkujännitteen verkkovirtaa vastaavaksi vaihtovirraksi. Akuista johdettua tasavirtaa voidaan käyttää esimerkiksi valaistuksessa, kun taas vaihtovirtaa käytetään erilaisissa laitteissa kuten tietokoneissa ja televisioissa. (Kuva 2.)(8.)



KUVA 2. Verkon ulkopuolinen aurinkosähköjärjestelmä (8)

Verkon ulkopuolisissa järjestelmissä inverttereiden sijaan voidaan käyttää lataussäädintä, joka muuntaa paneeleiden tuottaman sähkön akuille sopivaksi jännitteeksi ja valvoo akuston tilaa sekä toimintaa. Lataussäätimet voidaan jakaa Maximum Power Point Tracking eli MPPT ja Pulse-Width Modulation eli PWM-säätimiin. MPPT-säätimiä käytetään usein isompien aurinkosähköjärjestelmien kanssa, koska ne kestävät PWM-säätimiin verrattuna korkeampia jännitteitä ja virtoja. PWM-säätimet kestävät harvoin yli 30V:n jännitettä, joten jo teoriassa ne eivät sovellu käytettäväksi isompien paneeleiden kanssa. Tästä syystä niitä käytetään pienissä aurinkosähköjärjestelmissä, joissa ei ole korkeat jännitteet. MPPT-säätimet kuuluvat uuden sukupolven säätimiin, ja niiden avulla aurinkopaneeleiden tuottama sähkövirta voidaan muuntaa tehokkaasti ja hyvällä hyötysuhteella akustolle sopivaksi virraksi. Näiden säätimien toiminta perustuu maksimitehopisteiden hyödyntämiseen, jonka avulla saavutetaan hyvä hyötysuhde. MPPT-säätimien heikkous on PWM-säätimiä korkeampi tyhjäkäyntivirta ja -kulutus, joka täytyy huomioida etenkin talvella. PWM-säätimet ovat yksinkertaisia ja edullisia laitteita, joiden suurin heikkous on laskea paneelijännite sopivaksi akustolle. Tämän heikkouden takia PWM-säätimien hyötysuhde ei ole kovin hyvä. Huonosta hyötysuhteesta huolimatta PWM-säätimet soveltuvat hyvin myös talvikäyttöön matalan tyhjäkäyntikulutuksen takia, toisin kuin MPPT-säätimet. (9.)

3 INVERTTEREISTÄ

Invertteri voi olla 1- tai 3-vaiheinen. Nimensä mukaisesti 1-vaiheinen invertteri on kytketty verkon yhteen vaiheeseen ja 3-vaiheinen verkon jokaiseen kolmeen vaiheeseen. Kun invertteri on kytketty jokaiseen verkon vaiheeseen, voidaan sähköä syöttää jokaiseen kohteen sähkölaitteeseen. Mikäli invertteri on kiinni vain yhdessä verkon vaiheessa, voidaan tuotettua aurinkosähköä käyttää vain kytkettyihin sähkölaitteisiin. (1.) Tämä on iso syy miksi suurin osa inverttereistä on 3-vaiheisia. Normaalisti niiden avulla saadaan myös suurin hyöty, mutta on tilanteita missä 1-vaiheinen invertteri on parempi vaihtoehto. Tällaisia tilanteita ovat todella pienet aurinkosähköjärjestelmät sekä 1-vaiheiliittymät. (6.) 1-vaiheinverterit ovat käytännössä ainoa vaihtoehto alle 3 kWp suuruisiin aurinkosähköjärjestelmiin, koska niin pieniä 3-vaiheisiä inverttereitä ei ole saatavilla. (1.) Mikäli talouden sähköliittymä on 1-vaiheiliittymä, on siinä tapauksessa käytettävä 1-vaiheista invertteriä. Nämä ovat käytännössä ainoita tilanteita, missä 1-vaiheinvertteriä käytetään 3-vaiheinverttereiden sijaan poikkeustapauksia lukuun ottamatta. 3-vaiheisesta invertteristä saatava hyöty riippuu kuitenkin paljon sähkölaitteiden ryhmittelystä sekä siitä, millaisia asennuskohteen laitteet ovat. Tavallisesti verkon kaikkiin kolmeen vaiheeseen kytketään laitteet, jotka tarvitsevat suurta sähkötehoa. Silloin invertteri voi aurinkoisina päivinä syöttää sähköä näihin laitteisiin jokaisen vaiheen kautta. Tällaisia laitteita ovat mm. lämminvesivaraajat, kiukaat ja liedet. (6.)

Inverttereiden tärkein ominaisuus on aurinkopaneelien sähkövirran muuntaminen verkkosähköksi turvallisesti ja hyvällä hyötysuhteella. Muita invertterille tärkeitä ominaisuuksia ovat aurinkopaneelien asennuksen kaikenlainen tukeminen, sopivuus ulko- ja sisäasennukseen asennuspaikasta riippuen, mahdollisimman pitkä käyttöikä, helppo ja kattava toiminnan seuraaminen nettipohjaisella alustalla sekä mahdollisuus laajentamiseen lisäosilla. Lisäksi on tärkeää, että invertteri on sähkö- ja paloturvallinen sekä edullinen hankkia, asentaa ja käyttää. (6.) Invertterin perusominaisuuksiin kuuluu saatavan energian ja sähkövirran maksimointi erilaisten säätimien avulla. Invertteri säätää ja synkronoi erilaisia muuttujia niin, että sähkövirran laatu on määräyksien mukainen ja saadun sähkövirran määrä maksimaalinen. Tarvittaessa invertteri irroitetaan verkosta turvallisuuden tai muiden syiden takia. Saadun energian maksimointiin käytetään Maximum Power Point Trackers eli MPPT-järjestelmää. Aurinkopaneeleilla on kohta missä ne tuottavat eniten virtaa, ja MPPT-järjestelmä etsii jatkuvasti tätä kohtaa saatavan energian maksimoimiseksi. (10.)

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu yleensä yhdestä tai useammasta invertteristä tai virran optimoijasta. Joissain verkon ulkopuolisissa aurinkosähköjärjestelmissä voi käytössä olla myös lataussäädin invertterin sijasta, mutta suurimmassa osassa aurinkosähköjärjestelmiä on käytössä invertteri. Suuren mittakaavan aurinkovoimaloissa käytetään keskusinverttereitä, missä iso määrä aurinkopaneeleita on yhdistetty yhteen keskusinvertteriin. Pienemmän kokoluokan järjestelmissä voidaan käyttää esimerkiksi stringi-invertteriä, mikroinvertteriä, teho-optimoijaa tai hybridi-invertteriä. Stringi-invertteri on yleisin invertteri sekä Suomessa että maailmalla, mikä voidaan kytkeä verkossa sekä yhteen että kaikkiin kolmeen vaiheeseen. (7.)

Kun käytössä on useita inverttereitä, voidaan käyttöön ottaa niin sanottu combiner box eli yhdistelmälaatikko. Yhdistelmälaatikon tehtävänä on yhdistää usean stringin ulostulo yhteen. Ne myös yhdistävät tulevan tehon yhdeksi pääsyötöksi, joka jakautuu invertteriin. Yhdistelmälaatikko tulisi asentaa aurinkopaneelien ja invertterien väliin ja optimaalisesti sijoitettuna se voi vähentää tehohäviöitä. Kuvassa 3 on esitettynä kuva yhdistelmälaatikosta. (11.)



KUVA 3. Kuva combiner boxista eli yhdistelmälaatikosta (11)

3.1 Keskusinvertteri

Keskusinvertterit ovat usein 3-vaiheisia inverttereitä, jotka voivat sisältää verkon taajuusmuuntajan. Näissä aurinkovoimaloissa suuri määrä aurinkopaneeleja kytketään sarjaan, jolloin muodostuu suurjännitejono. Stringit kytketään tämän jälkeen rinnan invertterin kanssa. Keskusinverttereiden vahvuuksia ovat todella korkea luotettavuus sekä helppo ja yksinkertainen asennus. Niiden heikkoutena on puolestaan korkeammat yhteensopimattomuushäviöt sekä MPPT-seurantajärjestelmän puuttuminen jokaiselta stringiltä. Näistä syistä johtuen ongelmia voi aiheutua sellaisissa aurinkovoimaloissa, jotka käyttävät joko useita kallistus- ja suuntakulmia tai erilaisia moduulityyppejä. Myös varjostuksesta kärsivissä voimaloissa voi ilmetä ongelmia ja tuotannossa häviöitä. Kun säteilyn määrä on joskus alhainen, sammutetaan osa inverttereistä, jotta muut invertterit voivat toimia lähellä optimaalista pistettä. Tätä kutsutaan Master-slave-kokoonpanoksi, missä yksi invertteri hallitsee ja ohjaa myös muiden inverttereiden toimintaa. Kun säteilyn määrä taas nousee, käynnistyvät invertterit uudelleen. Tämä optimaalinen säätely lisää inverttereiden käyttöikää. (7.)

3.2 Stringi-invertteri

Stringi-invertterit ovat yleisimpiä käytössä olevia inverttereitä, joita saa sekä 1- että 3-vaiheisina. Ne soveltuvat parhaiten katoille, missä ei ole varjostusongelmia, koska mikäli edes yksi paneeli kärsii varjostuksesta, vaikuttaa se myös kaikkien muiden paneelien tuotantoon. (12.) Stringi-invertterit sijaitsevat yleensä lyhyen matkan päässä aurinkopaneeleista jossain suojaisessa paikassa. Suojaisessa paikassa inverttereiden elinikä on pidempi ja todennäköisyys vaaratilanteille pienempi (10.) Stringi-invertterit muuntavat aurinkopaneelilta tulevan tasavirran käyttökelpoiseksi vaihtovirraksi, jota voidaan käyttää halutulla tavalla. Tasavirtaa tuottavat aurinkopaneelit kytketään yleensä sarjaan invertterin kanssa, mitä sanotaan paneeliketjuksi. (6.)

Suuri syy stringi-inverttereiden suosioon on ollut niiden hyvä kestävyys ja kestoikä. Muita stringi-invertterin käytössä olevia hyviä puolia ovat sen edullinen hinta sekä huollon, vianmäärityksen ja uuden invertterin vaihdon helppous. Koska järjestelmä koostuu pääosin yhdestä invertteristä, on vianmääritys suhteellisen yksinkertaista. Stringi-invertterin heikkouksia ovat vaikeus laajentaa järjestelmää tulevaisuudessa sekä koko järjestelmän käyttökelvottomuus, mikäli invertteri hajoaa.

Stringi-invertterit mitoitetaan aurinkopaneelien kanssa asennuksen yhteydessä, eikä tätä invertterin mitoitusta voi muuttaa myöhemmin. Jos järjestelmää haluaa laajentaa, täytyy ostaa toinen invertteri tai ostaa uusi isompi invertteri. (12.)

3.3 Mikroinvertteri

Mikroinverttereiden paras käyttökohde ovat varjostetut katot, koska mikroinvertteri kytketään jokaiseen aurinkopaneeliin erikseen. Kun jokaisella paneelilla on erikseen oma invertteri, ei esimerkiksi yhden paneelin varjostin häiritse muiden toimintaa. Mikroinvertterit ovat hyviä myös sellaisilla katoilla, joille ei saada mahtumaan kokonaista paneeliriviä. Muita mikroinvertterin hyviä puolia ovat sen pitkä elinikä sekä mahdollisuus paneelitason valvontaan ja aurinkojärjestelmän laajentamiseen tulevaisuudessa. Koska jokaiseen paneeliin asennetaan erikseen oma invertteri, voidaan järjestelmää laajentaa yksinkertaisesti lisäämällä paneeli ja invertteri järjestelmään. Hintatasoltaan mikroinvertteri on jonkun verran kalliimpi asentaa kuin esimerkiksi stringi-invertteri, koska jokaiselle paneelille täytyy asentaa erikseen invertteri. Myös virheen mahdollisuus on suurempi mikroinvertterissä, koska inverttereitä asennetaan paljon suhteessa paneelien määrään, kun verrataan stringi- ja keskusinverttereihin. (10.)

3.4 Hybridi-invertteri

Hybridi-invertteri on mikroinvertterin ja akuston yhdistelmä, jossa molempien ominaisuudet on sisällytetty yhteen laitteeseen (13). Hybridijärjestelmiä on olemassa neljää eri päätyyppiä, joita ovat tavallinen hybridi-invertteri, monimuotoinen hybridi-invertteri, edistyneet AC-kytketyt järjestelmät sekä All-in-one akkuenergian varastointijärjestelmät (14). Toisin kuin tavalliset invertterit, hybridi-invertteri kykenee muuntamaan energiaa vaihtovirran lisäksi myös tasavirtaan vaihtokelpoisesti. Tämän ominaisuuden avulla ylimääräinen aurinkoenergia voidaan varastoida akkuun, josta sitä voidaan ottaa myöhemmin käyttöön. Vaihtoehtoisesti ylimääräinen aurinkoenergia voidaan myydä, jos sitä ei haluta varastoida tai akut ovat esimerkiksi täynnä. Monet hybridi-invertterit voivat toimia myös normaalin invertterin tavoin ilman akkua, jolloin ylimääräinen energia siirretään suoraan sähköverkkoon. Hybridijärjestelmän hyviä puolia ovat jatkuva virransaanti, järjestelmän koordinoitu seuranta sekä mahdollisuus ylivoimittaa järjestelmä. Jatkuvan virransaannin ja ylivoimituksen mahdollistaa akku, ilman akkua toimivissa hybridijärjestelmissä ei näitä mahdollisuuksia. Hybridijärjestelmän huonoja puolia ovat kallis asennus, vaikea prosessinhallinta sekä akun lyhyempi

käyttöikä, jonka lisäksi se vie enemmän tilaa kuin normaalilla invertterillä varustettu järjestelmä. (13.)

3.5 Virran optimoija

Virran optimoijat kytketään mikroinvertterin tavoin jokaiseen paneeliin, mutta inverttereistä poiketen ne eivät muunna tasavirtaa vaihtovirraksi vaan optimoivat paneelien tasasähköä. Virran optimoijat toimivat parhaiten huonommissa olosuhteissa, kuten varjoisilla katoilla tai useampaan eri suuntaan osoittavissa paneeleissa. Näissä huonommissa olosuhteissa optimoija lisää järjestelmän tehokkuutta MPPT:n avulla ja paneeleilla syntynyt tasavirta johdetaan invertterille muunnettavaksi. Virran optimoija ei siis yksinään pyöritä aurinkosähköjärjestelmää, jonka tarkoituksena on tuottaa vaihtovirtaa, vaan sen parina on aina invertteri. Virran optimoijan käytön hyviä puolia ovat mahdollisuus ylimitoittaa aurinkosähköjärjestelmä ja käyttää tasavirtasähköllä toimivia akkuja, tehokkuuden paraneminen huonommissa olosuhteissa sekä erittäin hyvä paneelien valvontajärjestelmä, jossa voidaan seurata paneelien toimintaa yksittäisellä tasolla todella tarkasti. Virran optimoijat ovat kuitenkin kustannuksiltaan hiukan kalliita asentaa, koska ne ovat suhteellisen uusia ja jokaiseen paneeliin täytyy asentaa erikseen oma optimoija. Tästä syystä virran optimoijia ei yleensä suositella käytettäväksi, mikäli olosuhteet ovat hyvät. (15.)

4 ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS TEOLLISTEN KIINTEISTÖJEN AURINKOVOIMAN TUOTANTOON

Teollisten kiinteistöjen aurinkosähköjärjestelmät ovat maksimissaan 1 MW kokoisia järjestelmiä. Nämä aurinkosähköjärjestelmät sijaitsevat usein rakennuksien katolla, mutta ne voivat sijaita myös joissain tapauksissa rakennuksen läheisyydessä. Tässä työssä teollisten kiinteistöjen vertailu on suoritettu kolmen eri kokoisen kuvitteellisen aurinkosähköjärjestelmän avulla. Aurinkosähköjärjestelmät ovat kooltaan 50 kW, 100 kW sekä 500 kW. Vertailussa on käytetty stringi-inverttereitä sekä hybridi-inverttereitä. Mikroinverttereitä ei ole järkevää ottaa mukaan tämän kokoluokan ratkaisuihin, koska se on asennettava jokaiseen paneelin erikseen mikä ei ole järkevää hiukan isommissa aurinkosähköjärjestelmissä. Mikroinverttereitä käytettäessä sekä kustannukset että virheen riski asennettaessa kasvavat. Vertailu on tehty sekä ylimitoituksella, että ilman ylimitoitusta. Ylimitoituksella tarkoitetaan paneelimäärän kasvattamista invertterin tehoon nähden. Invertterin voi ylikuormittaa jopa 1,5 kertaisesti sen nimellistehoon nähden, mutta ylikuormituksen sallittu määrä on kuitenkin aina invertterikohtaista. Tämän takia on aina hyvä tarkistaa invertterin maksimaaliset suorituskyvyt, kun invertteriä ylimitoitetaan. Kuvissa on esitetty kaikkien käytettyjen inverttereiden häviöt yhteensä, jolloin niistä on helpommin nähtävissä eri inverttereiden ominaisuudet.

Tässä vertailussa on laskettu myös kyseisen kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän vaatima minimikoko. Todellisuudessa vaadittava aluekoko on kuitenkin todennäköisesti aina vähintään hieman suurempi. Laskennassa on käytetty 500 Wp aurinkopaneeleita. Wp eli Wattipiikki kuvaa aurinkopaneelin tuottamaa huipputehoa. Vaadittava aluekoko saadaan kaavoilla 1 ja 2. Kaavalla 1 saadaan yhden paneelin koko neliömetreinä ja kaavalla 2 vaadittava alueen koko.

$$A_{\text{paneeli}} = (x_{\text{leveys}} + l_{\text{paneeliväli}}) \times (y_{\text{pituus}} + l_{\text{paneeliväli}}) \quad \text{KAAVA 1}$$

A_{paneeli} = yhden paneelin koko paneelivälit huomioiden (mm²)

x_{leveys} = paneelin pituus leveyssuunnassa (mm)

y_{paneeli} = paneelin pituus pituussuunnassa (mm)

$l_{\text{paneeliväli}}$ = paneelien vaadittava etäisyys toisistaan (mm)

$$\begin{aligned} A_{\text{paneeli}} &= (1310\text{mm} + 15\text{mm}) \times (1956\text{mm} + 15\text{mm}) = 2\,611\,575\text{mm}^2 \\ &= 2,611575\text{m}^2 \end{aligned}$$

Seuraavana voidaan laskea alueelle vaadittava minimikoko, kun kerrotaan yhden paneelin koko tarvittavalla määrällä paneeleja. Esimerkkitapauksessa 50 kW järjestelmään asennettaisiin 100 kpl 500 Wp paneeleita.

$$A = A_{\text{paneeli}} \times \eta_{\text{paneeli}}$$

KAAVA 2

A= vaadittava alueen koko (m²)

A_{paneeli}= yhden paneelin koko paneelivälit huomioiden (m²)

η_{paneeli}= paneelien lukumäärä (kpl)

$$A = 2,611575m^2 \times 100 = 261,1575m^2 \approx 261,16m^2$$

Paneeleiden massa on myös tärkeä laskea, kun paneelit asennetaan katolle. Paneelien yhteispaino saadaan yksinkertaisesti kaavalla 3.

$$m = m_{\text{paneeli}} \times \eta_{\text{paneeli}}$$

KAAVA 3

m= paneeleiden yhteismassa (kg)

m_{paneeli}= paneelin massa (kg)

η_{paneeli}= paneelien lukumäärä (kg)

$$m = 26kg \times 100 = 2600kg$$

Taulukossa 1 on esitettyä kaikkien eri kokoisten järjestelmien vaatima minimikoko sekä paneelien yhteispaino.

TAULUKKO 1

Järjestelmän koko	Alueen vaadittava koko	Paneeleista syntyvä massa
50 kWp	261,16 m ²	2600 kg
100 kWp	522,32 m ²	5200 kg
500 kWp	2611,58 m ²	26 000 kg

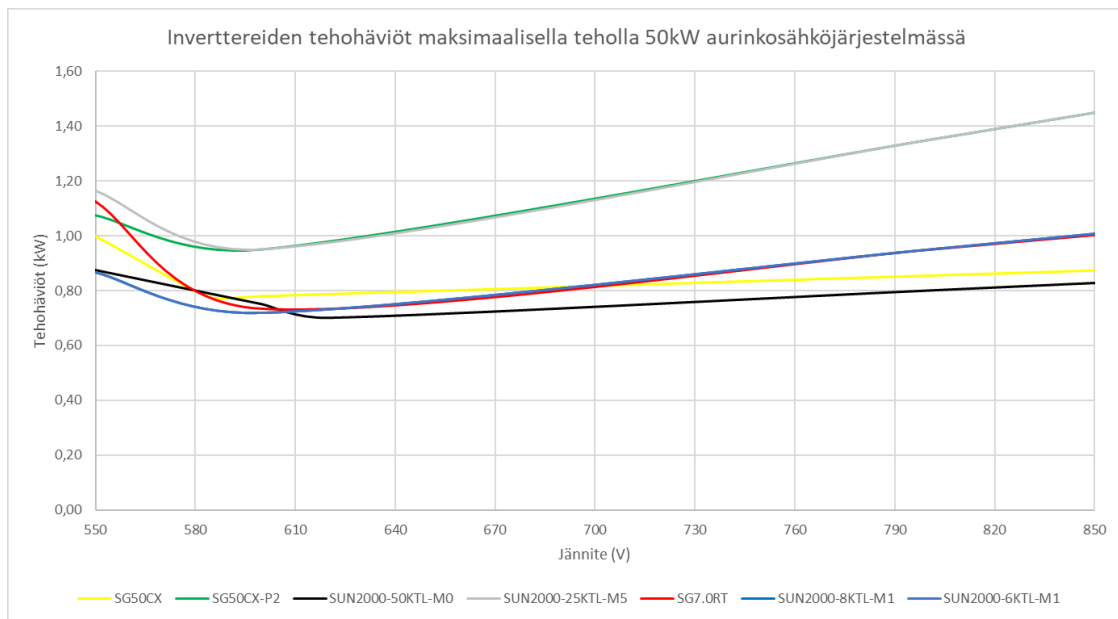
Vertailussa on siis käytetty kolmen eri kokoluokan kuvitteellisia järjestelmiä, jolloin tutkittavien inverttereiden määrä on suuri. Taulukossa 2 on listattuna jokainen käytetty invertteri, missä näkyy invertterin valmistaja sekä invertterin tyyppi.

TAULUKKO 2

Valmistaja	Malli	Stringi/hybridi
Sungrow	SG250HX	Stringi
CanadianSolar	CSI-250K-T800	Stringi
Sungrow	SG125CX-P2	Stringi
Huawei	SUN2000-115KTL-M2	Stringi
Sungrow	SG110CX	Stringi
Huawei	SUN2000-100KTL-M1	Stringi
Huawei	SUN2000-90KTL-H2	Stringi
Sungrow	SG50CX	Stringi
Sungrow	SG50CX-P2	Stringi
Huawei	SUN2000-50KTL-M0	Stringi
Huawei	SUN2000-45KTL-US-HV-D0	Stringi
Huawei	SUN2000-40KTL-M3	Stringi
Sungrow	SG40CX	Stringi
Sungrow	SG36CX-P2	Stringi
Sungrow	SG30CX	Stringi
Huawei	SUN2000-25KTL-M5	Stringi
Sungrow	SG20RT	Stringi
Huawei	SUN2000-20KTL-M0	Stringi
Huawei	SUN2000-10KTL-M1	Hybridi
Huawei	SUN2000-8KTL-M1	Hybridi
Sungrow	SG7.0RT	Stringi
Huawei	SUN2000-6KTL-M1	Hybridi

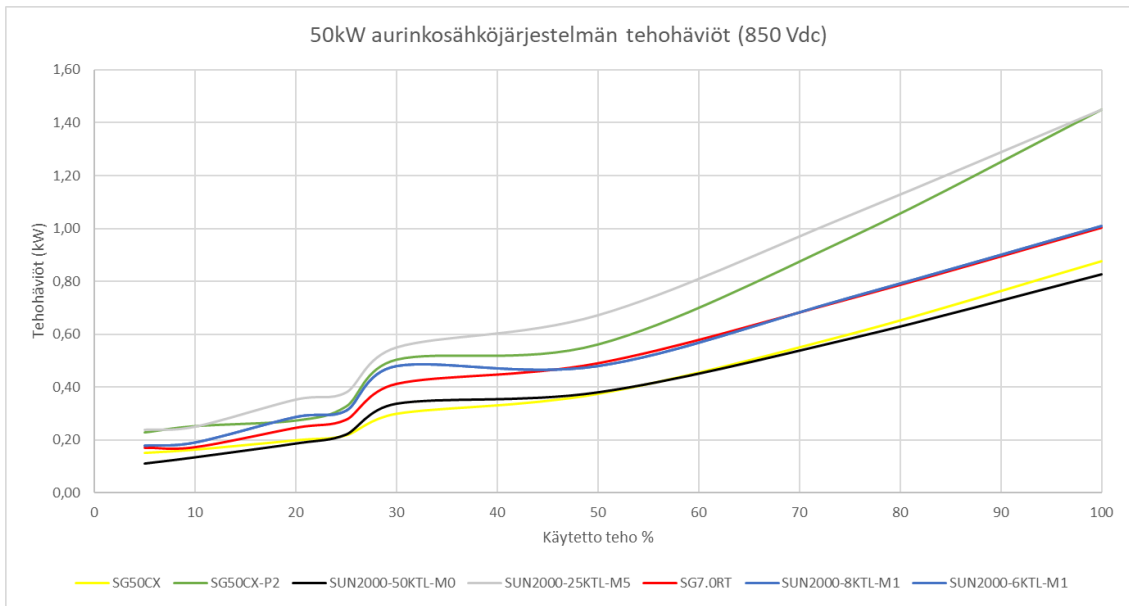
4.1 50 kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta

Ilman ylimitoitusta olevan järjestelmän vertailussa on mukana seitsemän invertteriä, joista viisi on stringi-inverttereitä ja kaksi hybridi-inverttereitä. Kuvassa 4 on esitetty inverttereiden tehohäviöt 100 % teholla eri jännitteillä. Kuvan perusteella ei yksiselitteisesti voida sanoa, että toinen invertterityyppi olisi selkeästi parempi. Kuvasta huomataan, että hybridi-invertterit ovat matalammilla jännitteillä jopa parempia, mutta jännitteiden noustessa se tipahtaa vertailussa keskivaiheille. SG50CX-P2 ja SUN2000-25KTL-M5 stringi-invertterit tuottavat kuitenkin koko ajan suurempia tehohäviöitä maksimaalisella teholla, jonka takia ei voida suoraan todeta, että jokainen stringi-invertteri on parempi kuin hybridi-invertteri 50 kW kokoisessa järjestelmässä. Todennäköisempää kuitenkin on, että stringi-invertteri on parempi vaihtoehto häviöllisesti, koska useampi stringi-invertteri näyttää tuottavan vähemmän tehohäviöitä. Kuvassa on myös hyvin nähtävissä, kuinka kyseisten inverttereiden optimaaliset toimintajännitteet ovat suhteellisen pieniä.

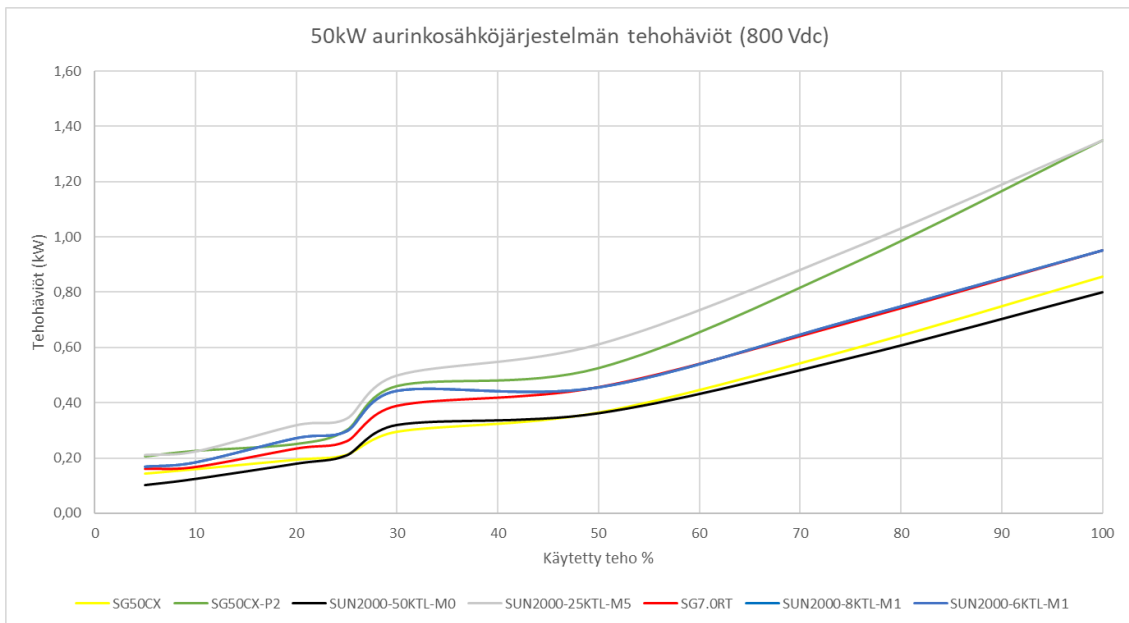


KUVA 4. Inverttereiden tehohäviöt maksimaalisella teholla 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta

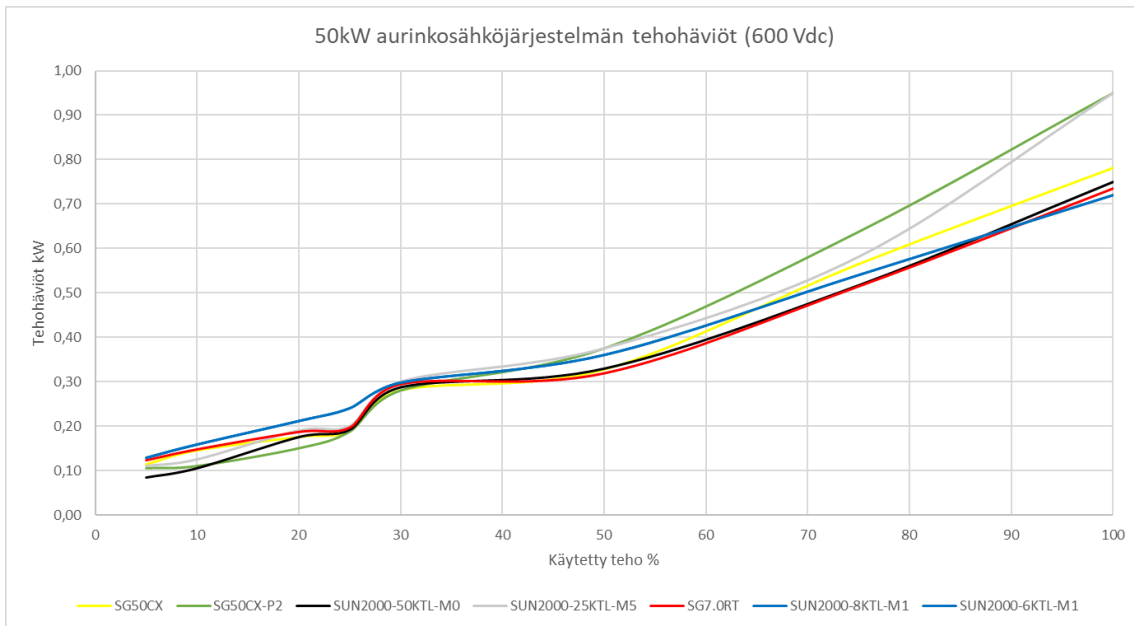
Inverttereille suoritettiin lisäksi vertailu 5–100 % tehoilla neljällä eri jännitteellä: 850 V, 800 V, 600 V ja 550 V. Kuvissa on huomattavissa, että pienemmillä jännitteillä erot ovat pieniä, etenkin silloin kun tehot eivät ole lähellä maksimaalisia tehoja. Jännitteen noustessa myös erot kasvavat. Inverttereiden tehohäviöt ilman ylimitoitusta on esitetty kuvissa 5–8.



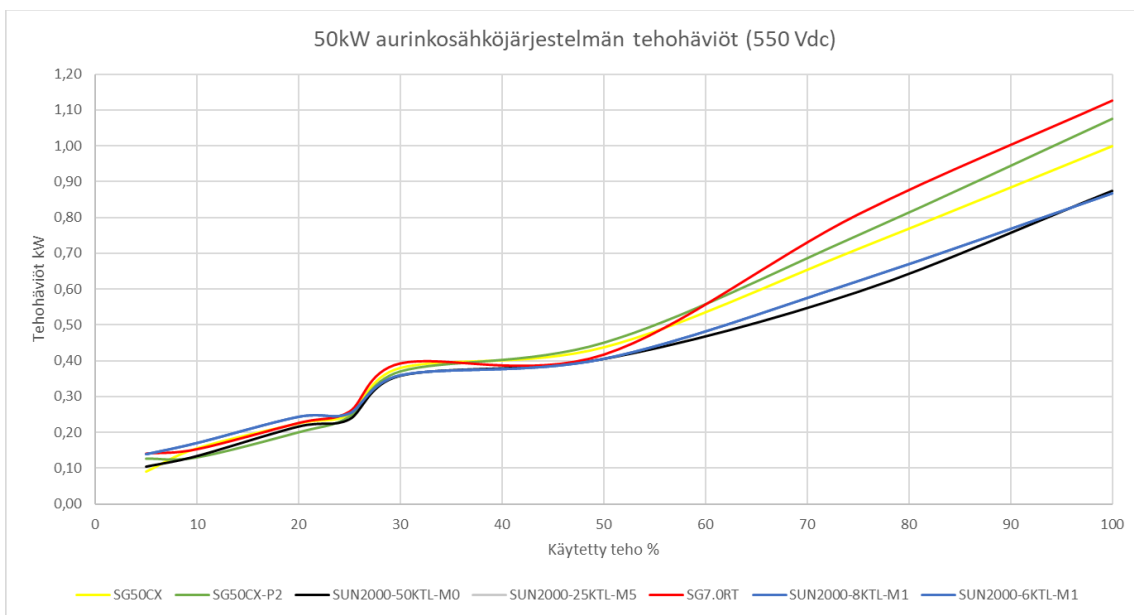
KUVA 5. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä



KUVA 6. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä



KUVA 7. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä

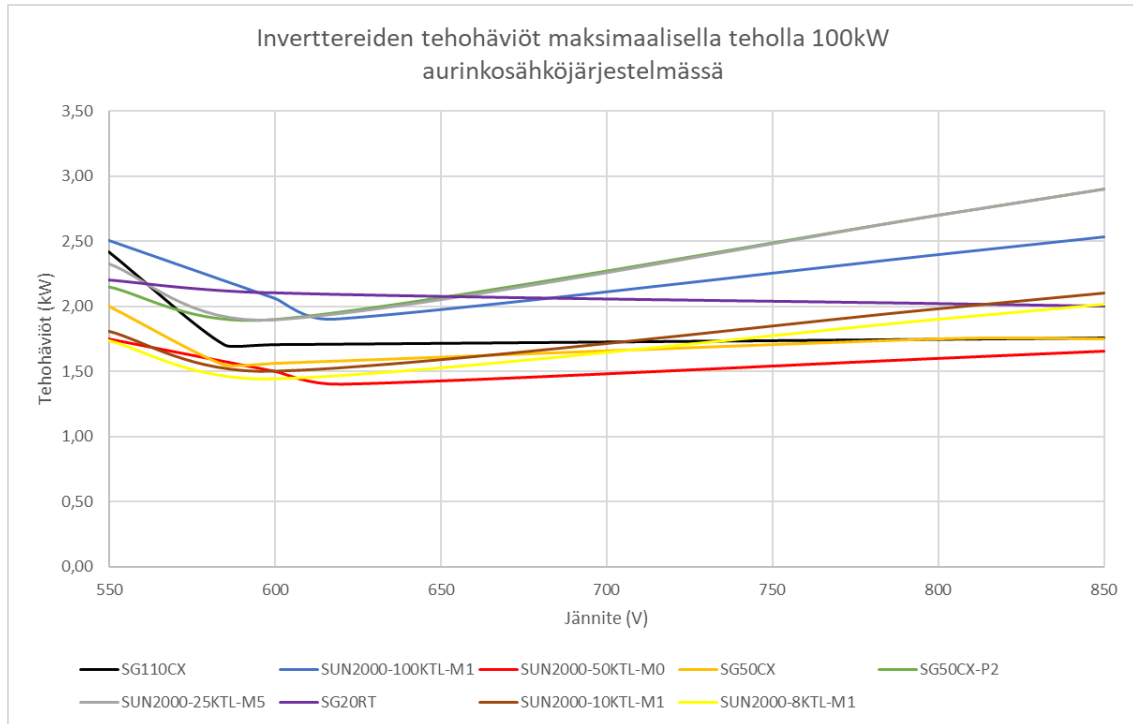


KUVA 8. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä

4.2 100kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta

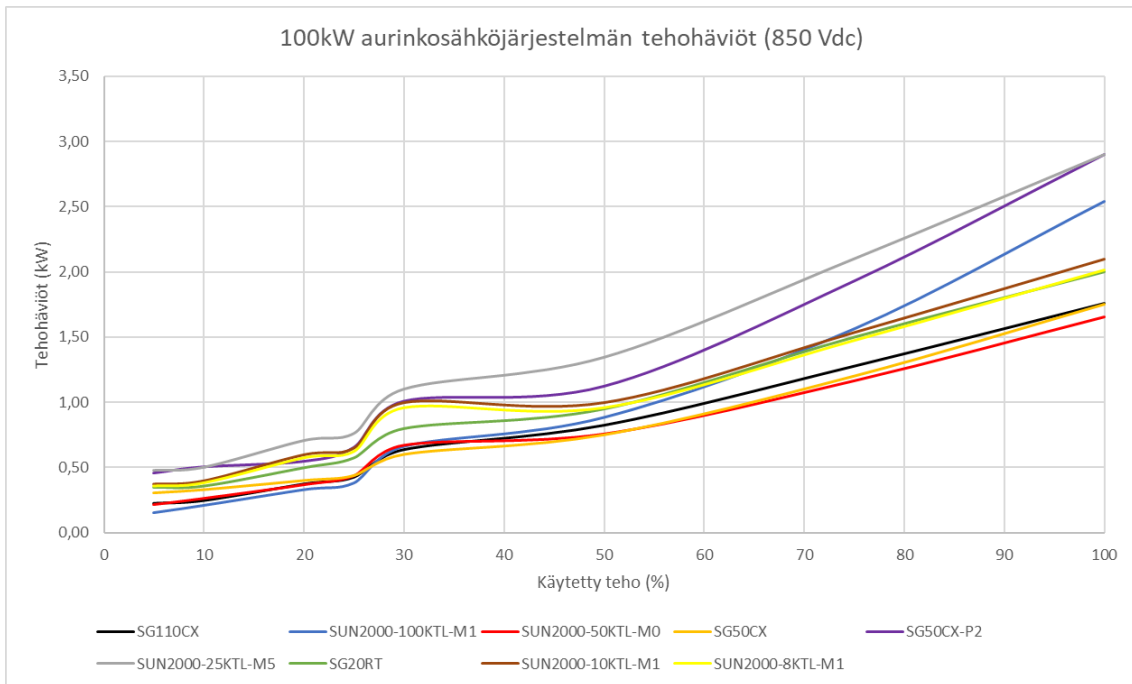
Ilman ylimitoitusta olevassa 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä on vertailtu yhdeksää invertteriä, joista kaksi on hybridi-inverttereitä ja seitsemän stringi-inverttereitä. Kuvasta 9 huomataan, että

myös 100 kW kokoisessa järjestelmässä Huaweiin 10 kW ja 8 kW SUN hybridi-invertterit toimivat hyvin stringi-inverttereihin verrattuna. Niitä ei kuitenkaan tässä tapauksessa ole järkevää valita, koska kulut nousevat merkittävästi. Kuvasta lisäksi huomataan, että invertterin koolla ei näytä olevan merkitystä sen tuottamiin häviöihin. Tämän perusteella voidaan sanoa, että on tärkeää valita juuri oikeanlainen invertteri ja oikea lukumäärä.

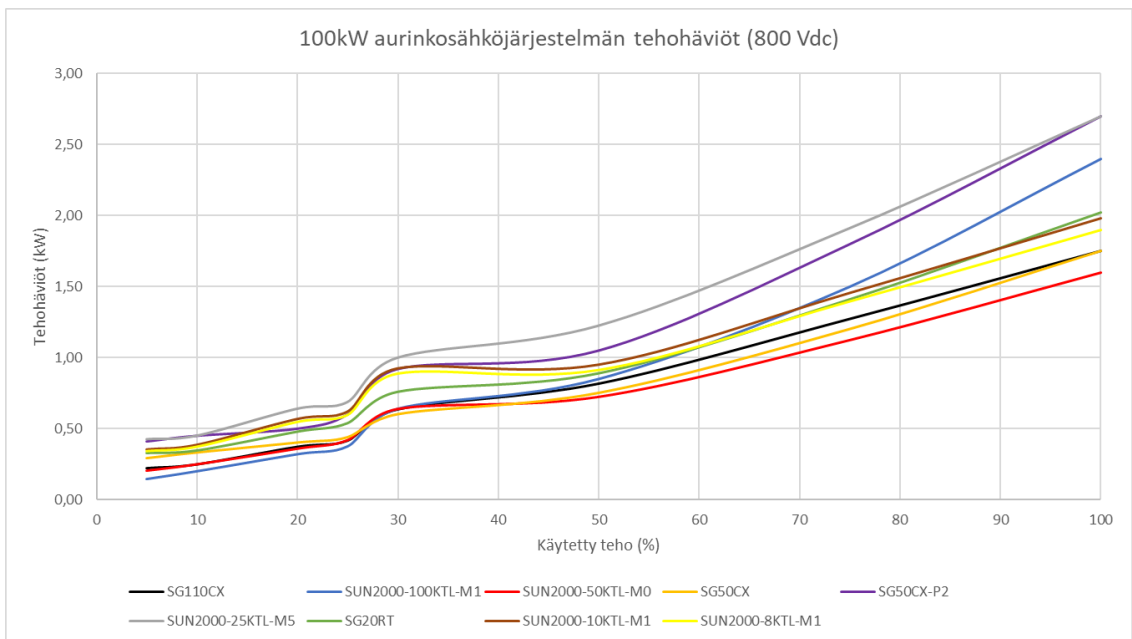


KUVA 9. Inverttereiden tehohäviöt maksimaalisella teholla 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta

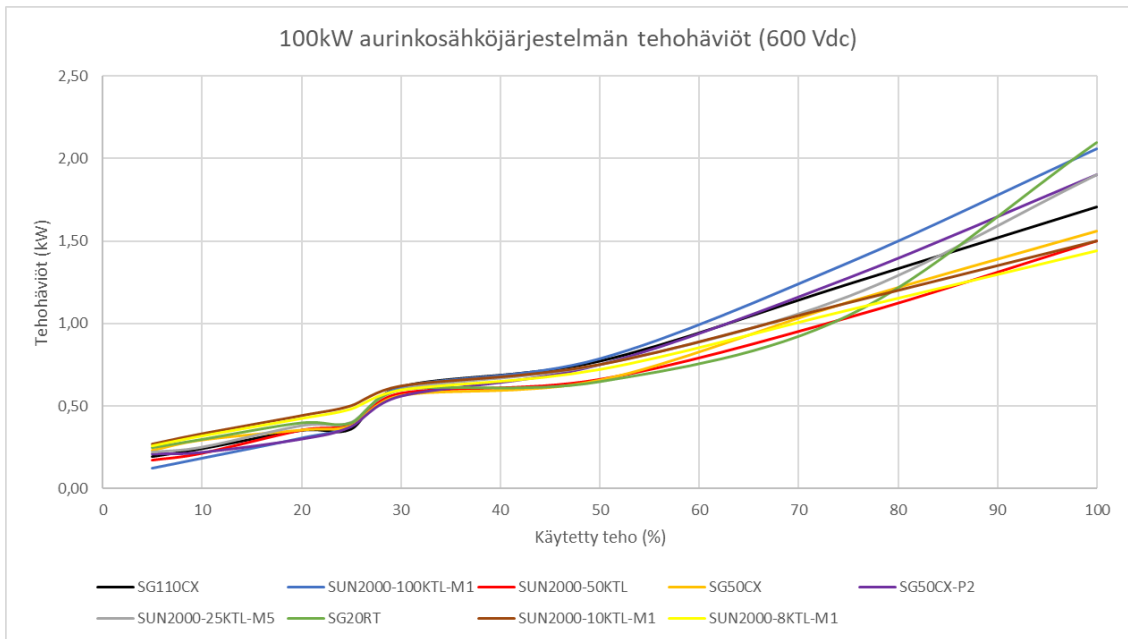
Kuvissa 10–13 on huomattavissa samoja asioita kuin 50 kW aurinkosähköjärjestelmän kohdalla, eli hybridi-invertterit toimivat hyvin stringi-inverttereihin verrattuna. Matalammilla jännitteillä hybridi-invertterit toimivat hyvin sekä pienemmillä että isommilla tehoilla, ja korkeilla jännitteillä lähellä maksimaalisempia tehoja. Kuvissa on kuitenkin pienet hybridi-invertterit mukana vain vertailun vuoksi, eikä niitä ole järkevää käyttää hinnan ollessa reilusti korkeampi kuin isommalla stringi-invertterillä.



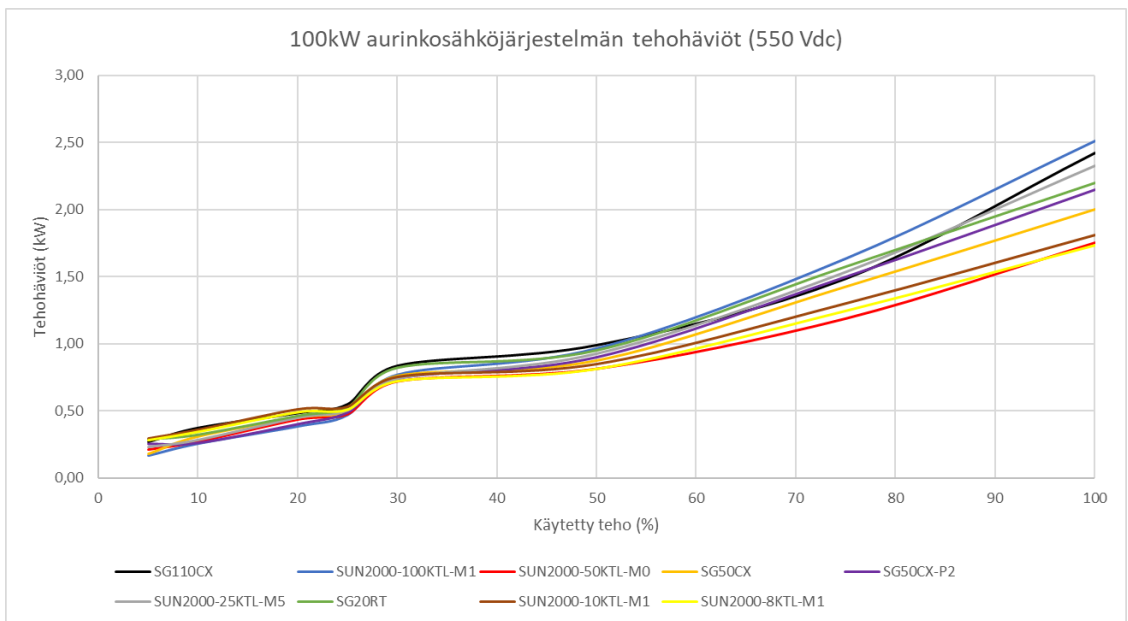
KUVA 10. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä



KUVA 11. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä



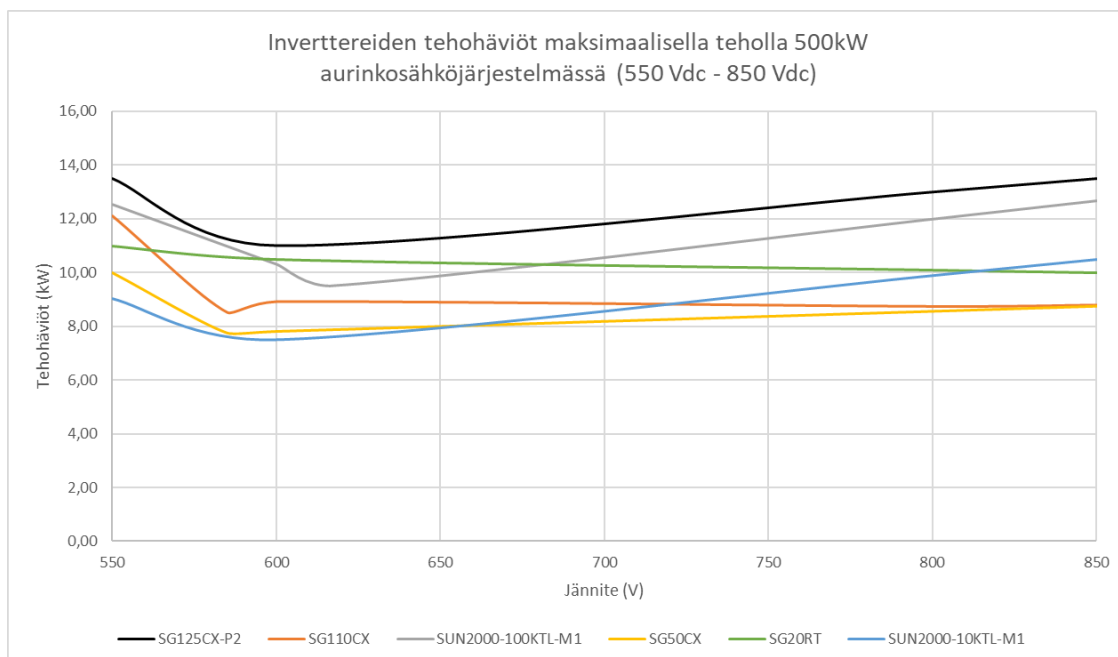
KUVA 12. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä



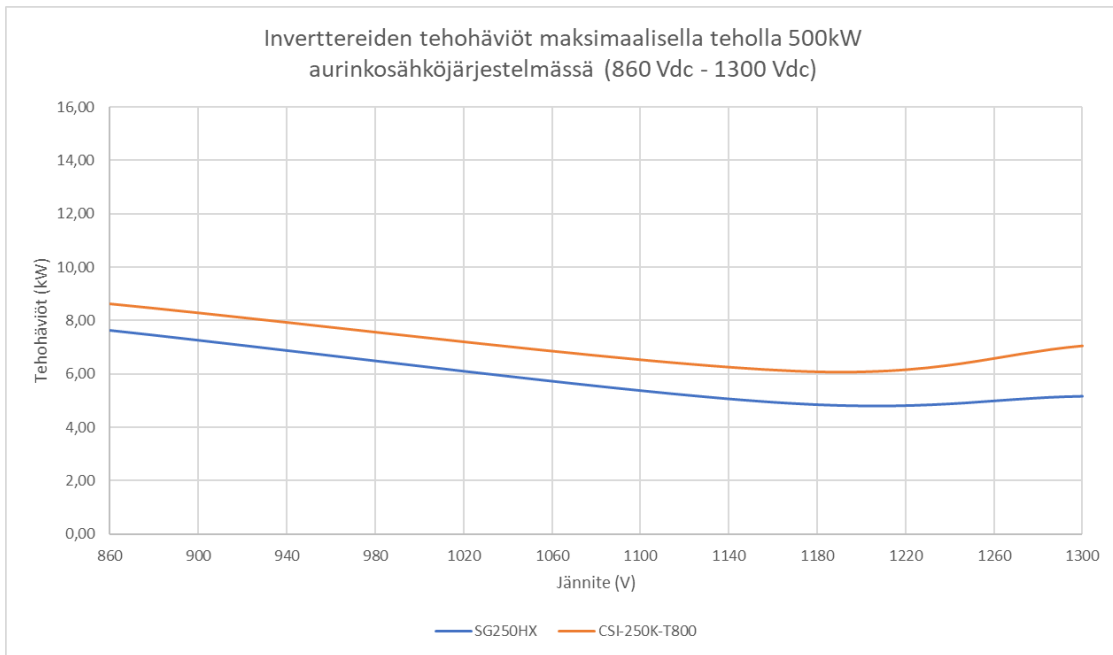
KUVA 13. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä

4.3 500 kW aurinkosähköjärjestelmä ilman inverttereiden ylimitoitusta

Ilman ylimitoitusta olevan 500 kW aurinkosähköjärjestelmän vertailussa on käytetty kahdeksaa eri invertteriä. Inverttereistä ainoastaan yksi on hybridi-invertteri, koska hybridi-inverttereistä on vaikeaa löytää tarpeeksi kattavia tietoja, mutta se ei tätä vertailua tehdessä haittaa. Kuvissa 14 ja 15 on nähtävissä inverttereiden tehohäviöt maksimaalisilla tehoilla. Myös isommissa 500 kW järjestelmissä on huomattavissa, että hybridi-invertterit pärjäävät hyvin matalammilla jännitteillä, mutta jännitteen noustessa stringi-invertterit alkavat olla parempia vaihtoehtoja. Myöskään 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä pieniä hybridi-inverttereitä ei ole järkevää käyttää, koska inverttereiden hinta moninkertaistuu. Kuvassa 14 on kuusi eri invertteriä matalammalla jännitteellä ja kuvassa 15 kaksi invertteriä isommalla jännitteellä.

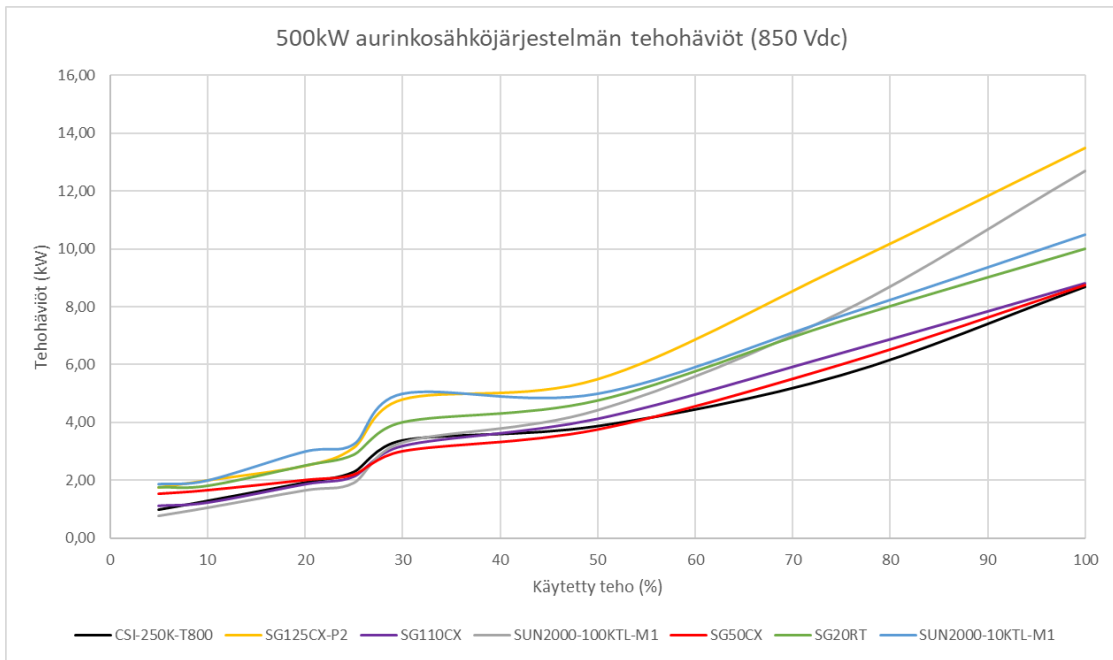


KUVA 14. Inverttereiden tehohäviöt maksimaalisella teholla 500kW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta, kun jännite on 550–850 V

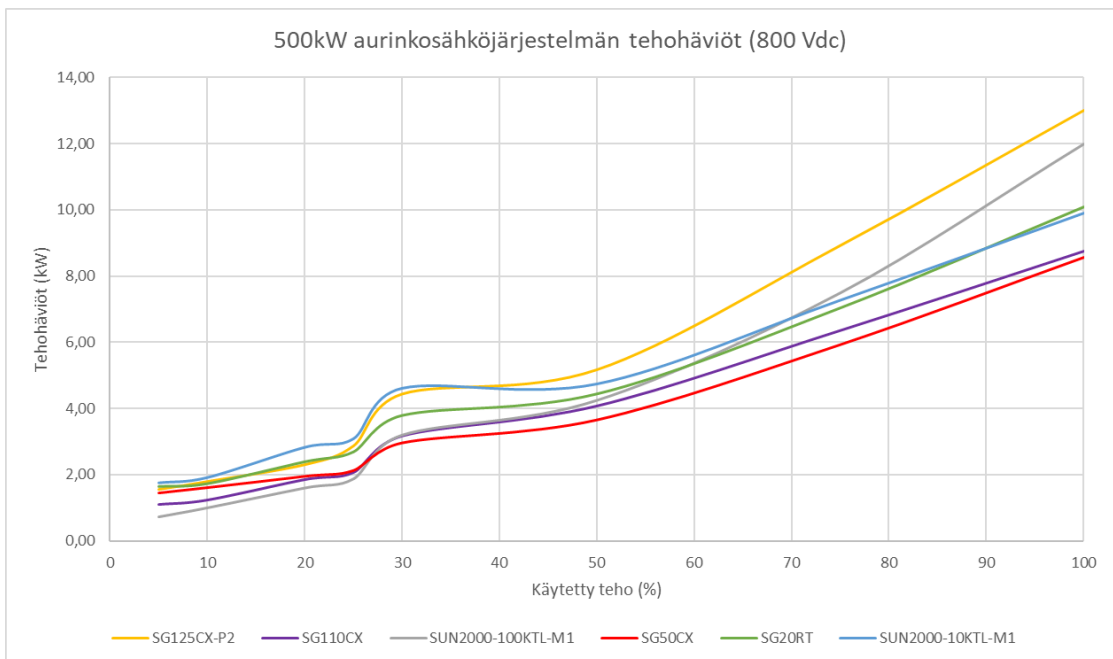


KUVA 15. Inverttereiden tehohäviöt maksimaalisella teholla 500kW aurinkosähkö-järjestelmässä ilman ylimitoitusta, kun jännite on 860–1300 V

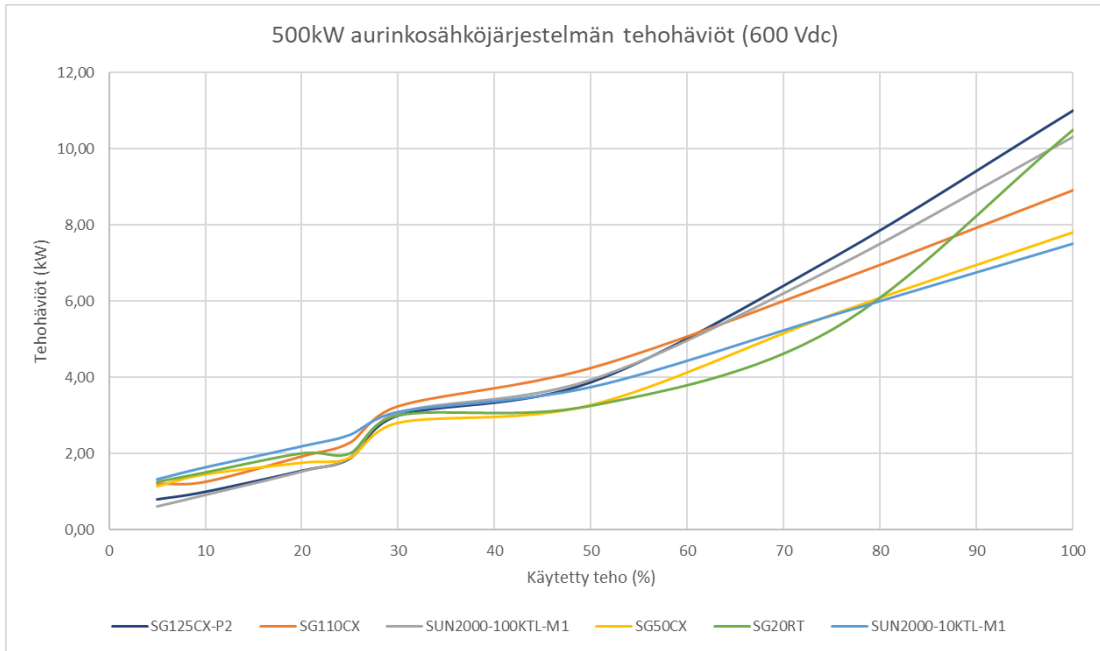
Inverttereiden tehohäviöt eri jännitteillä 5–100 % tehoilla 500 kW järjestelmässä on esitetty kuvissa 16–19. Kuvista huomataan, että stringi-inverttereiden tehokkuus paranee hybridi-invertteriin verrattuna jännitteen noustessa. 550 V käyrästössä huomataan, että hybridi-invertteri toimii paremmin, kun teho on vähintään 50 % maksimaalisesta. Kuitenkin 850 V tultaessa hybridi-invertteri on tippunut jo keskivaiheille tehohäviöiden vertailussa. Sillä ei kuitenkaan ole väliä, koska 500 kW kokoiseen järjestelmään stringi-invertterit sopivat paremmin reilusti pienempien kulujen takia. Kuvista myös huomataan, että yksiselitteisesti ei voida sanoa, että isommat invertterit ovat parhaimpia.



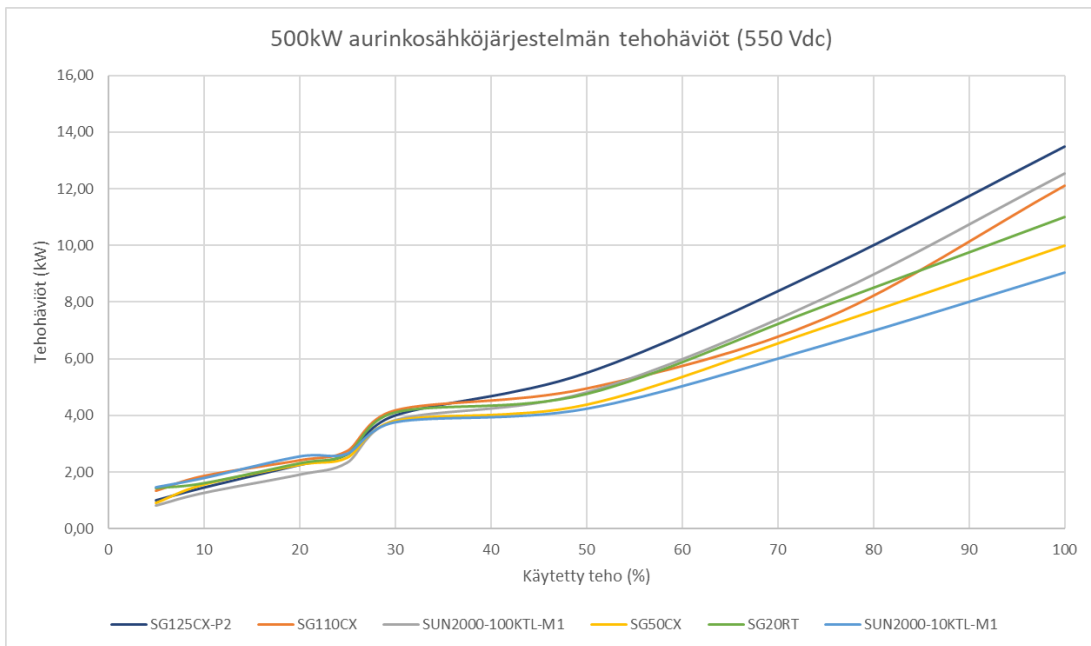
KUVA 16. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä



KUVA 17. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä



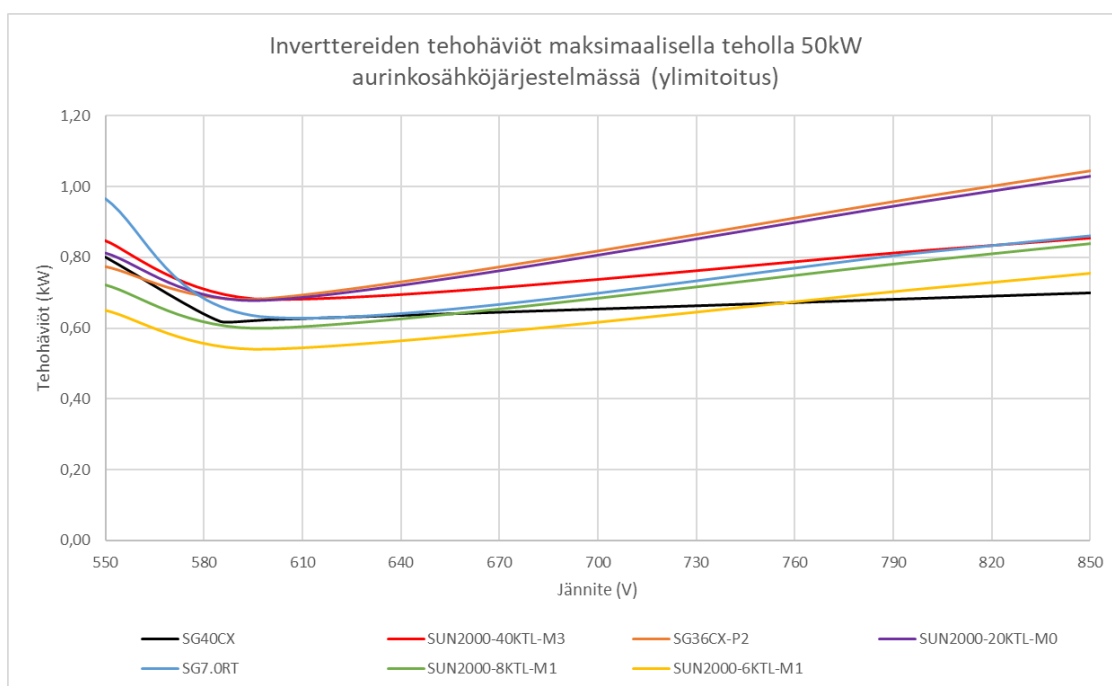
KUVA 18. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä



KUVA 19. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla ilman ylimitoitusta 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä

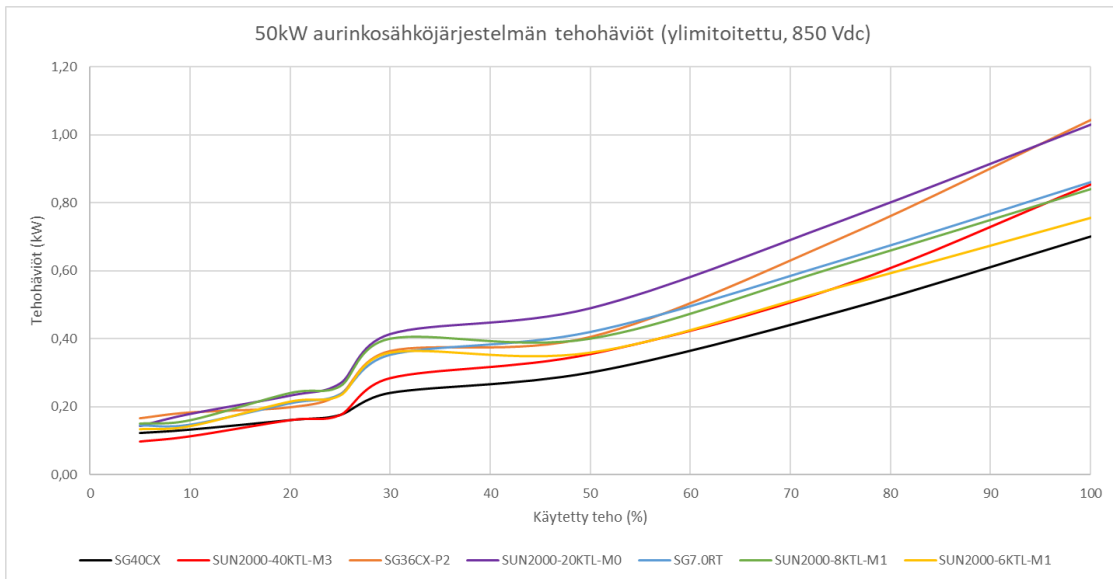
4.4 50 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella

50 kW ylimitoitettun aurinkosähköjärjestelmän vertailussa on käytetty seitsemää invertteriä, joista kaksi on hybridi-inverttereitä ja loput stringi-inverttereitä. Kuvassa 20 on nähtävissä 50 kW aurinkosähköjärjestelmä, jossa invertterit on ylimitoitettu ja toimivat maksimaalisella teholla. Suurin ero kuvaan 4 nähden missä inverttereitä ei olla ylimitoitettu on, että hybridi-inverttereiden tehohäviöt ovat pienemmät kuin suurimmalla osalla stringi-inverttereistä. Ainoastaan SG40CX stringi-invertteri vaikuttaisi olevan parempi vaihtoehto kuin Huaweiin 8 kW ja 6 kW hybridi-invertterit. Tämän perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että 50 kW kokoisissa laitoksissa hybridi-invertteri voi olla hyvä vaihtoehtoinen vaihtoehto.

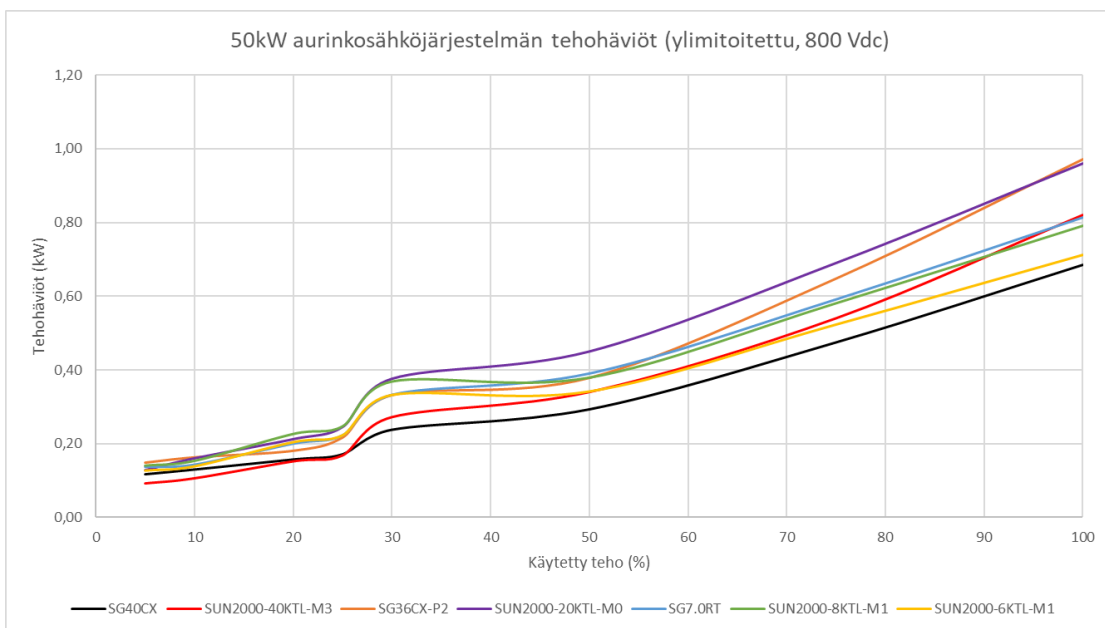


KUVA 20. Inverttereiden tehohäviöt eri jännitteillä 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä maksimaalisella teholla, kun invertterit on ylimitoitettu

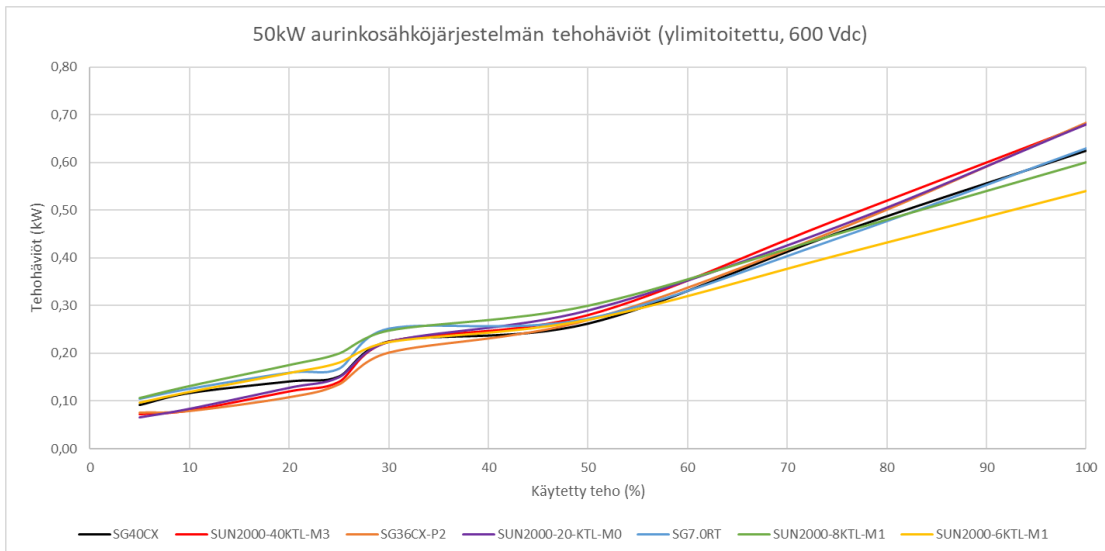
Kuvissa 21–24 inverttereiden tehohäviöt on esitetty tarkemmin 850–550 V jännitteillä. Myös näissä kuvissa huomataan, että etenkin pienillä jännitteillä hybridi-invertteri vaikuttaisi olevan oikein hyvä vaihtoehto. Suuremmilla jännitteillä hybridi-invertterit toimivat edelleen hyvin, mutta ainoastaan maksimaalisen tehon lähellä. Hieman pienemmällä teholla stringi-invertterit toimivat hyvin hybridi-inverttereihin verrattuna.



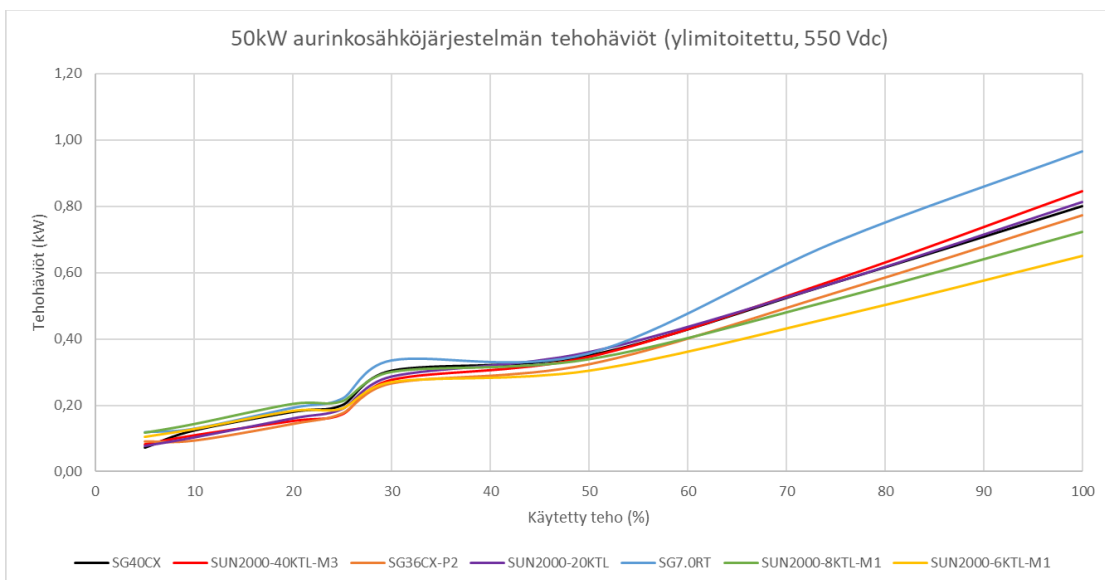
KUVA 21. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 22. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 23. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

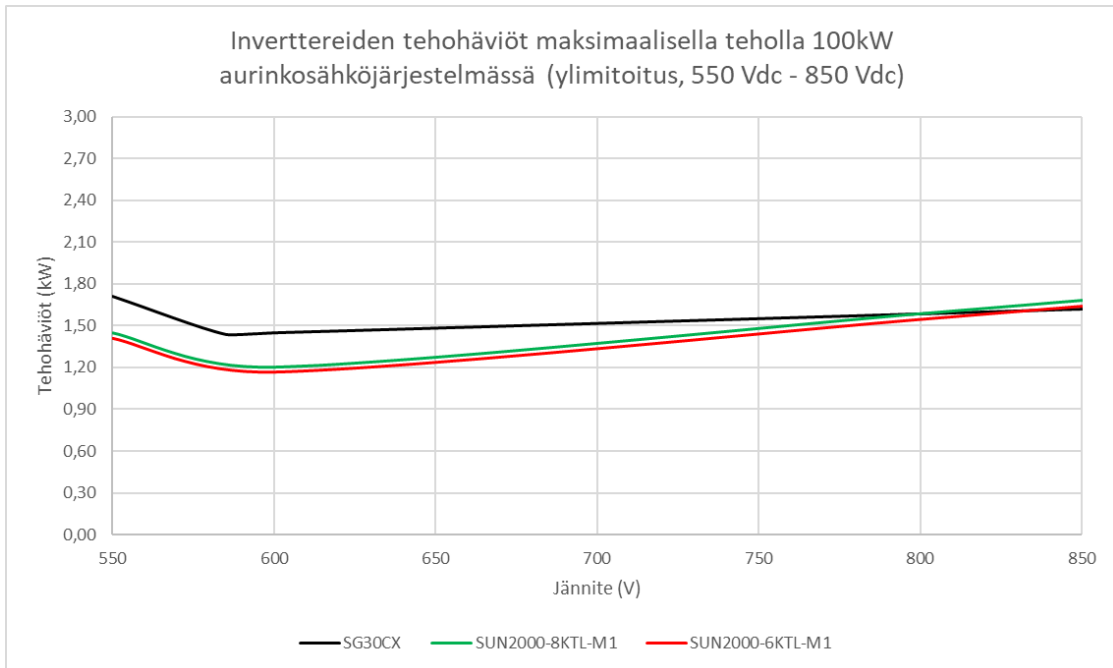


KUVA 24. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla 50 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

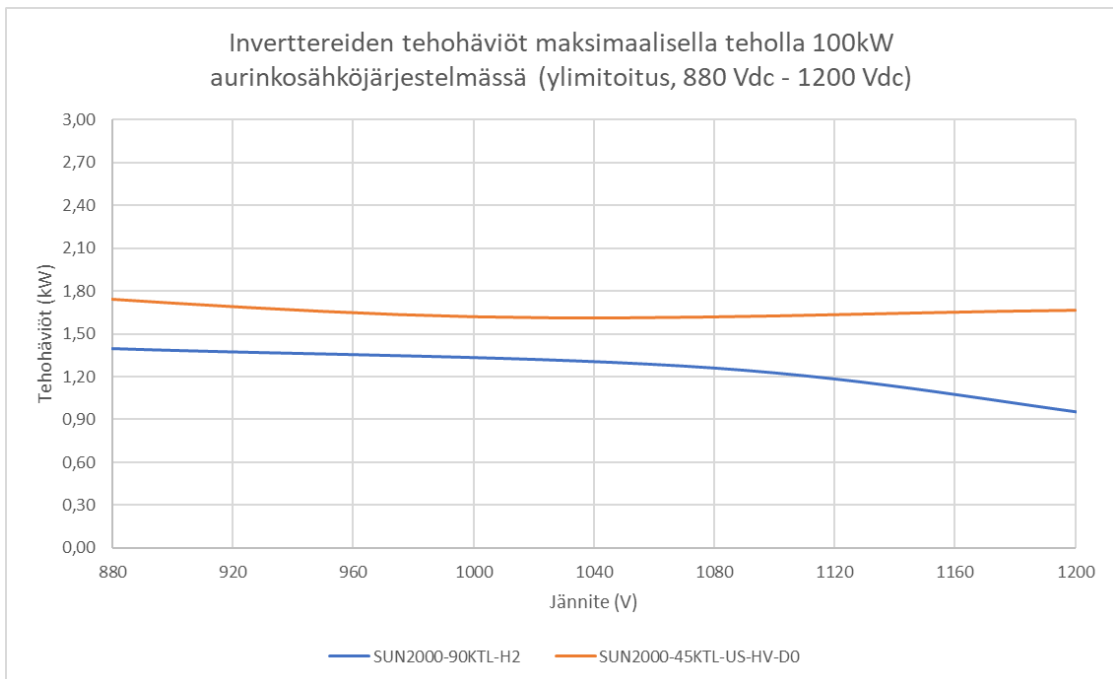
4.5 100 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella

Kuvissa 25 ja 26 nähdään 100 kW ylimitoitettu aurinkosähköjärjestelmä. Kuvassa 25 on yksi stringi-invertteri ja kaksi hybridi-invertteriä 550–850 V jännitteillä ja kuvassa 26 kaksi stringi-invertteriä 880–1200 V jännitteillä. Kuvista huomataan, että hybridi-invertterit toimivat hyvin, mutta invertterille on myös tärkeää toimia lähellä sen optimaalista jännitettä. Vaikka hybridi-invertterit toimivat hyvin

tehohäviöllisesti, ei niitä kuitenkaan kannata korkeamman hinnan takia käyttää myöskään ylimitoitussa 100 kW järjestelmässä.

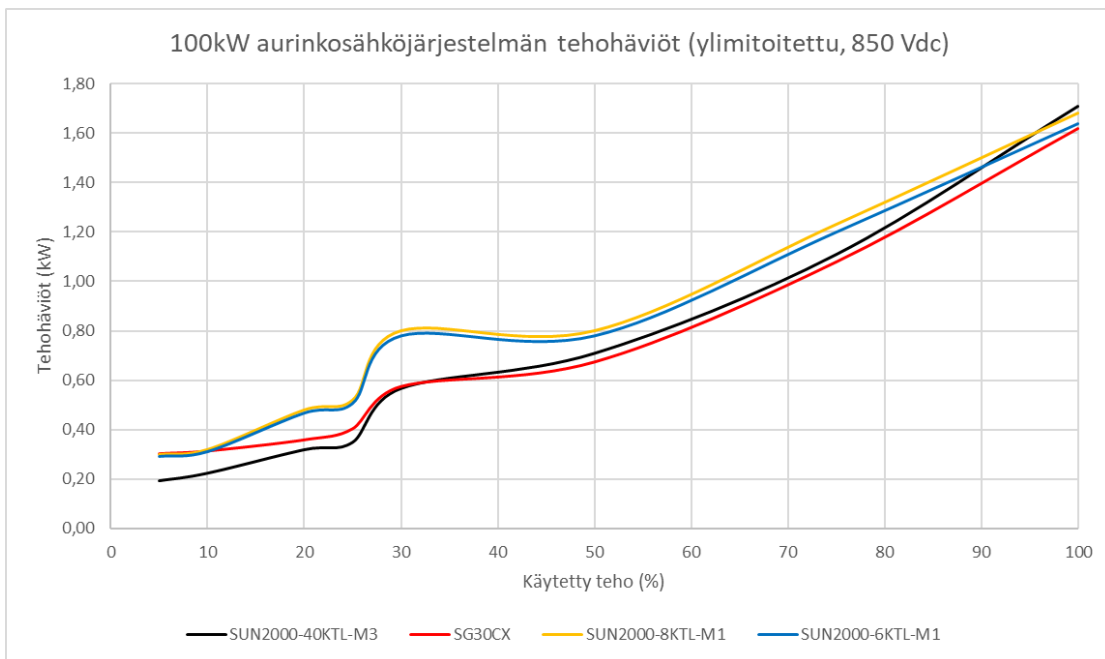


KUVA 25. Inverttereiden tehohäviöt 550–850 V jännitteillä 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä maksimaalisella teholla, kun invertterit on ylimitoitettu

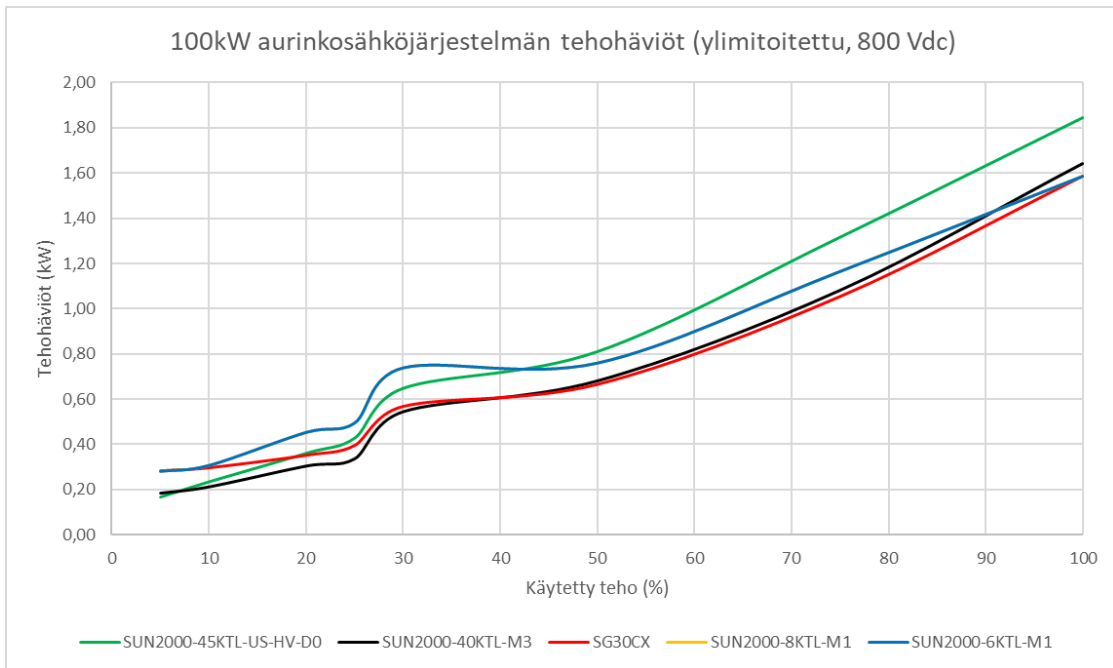


KUVA 26. Inverttereiden tehohäviöt 880–1200 V jännitteillä 100kW aurinkosähköjärjestelmässä maksimaalisella teholla, kun invertterit on ylimitoitettu

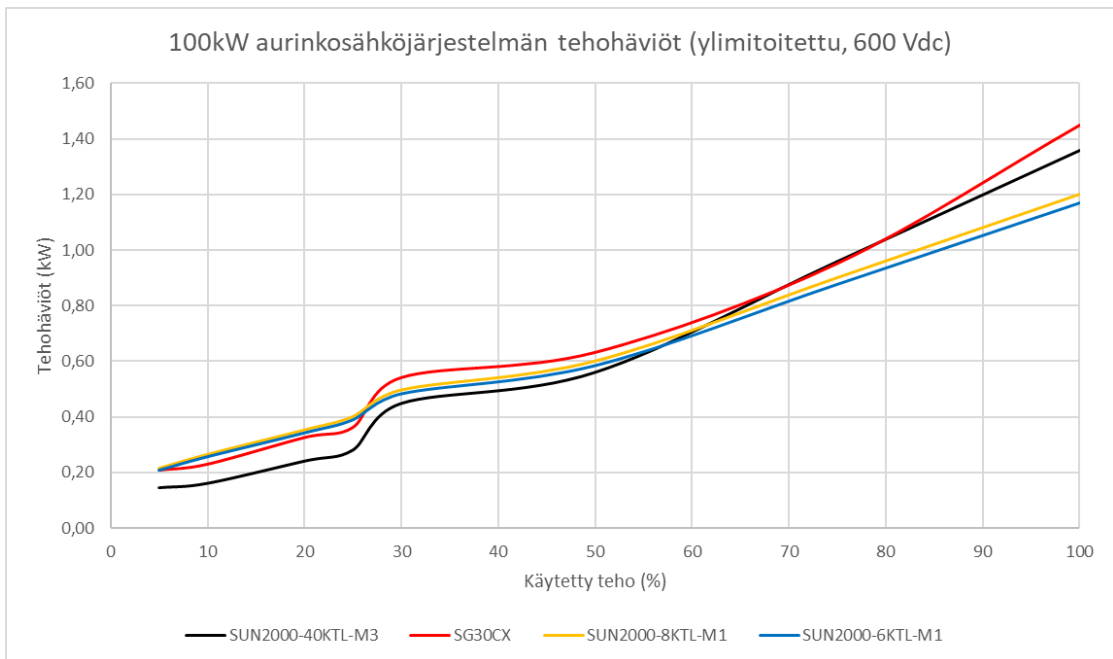
Kuvissa 27–30 on nähtävissä ylimitoitetun 100 kW aurinkosähköjärjestelmän tehohäviöt neljällä eri jännitteellä. Myös 100 kW ylimitoitetussa järjestelmässä hybridi-invertteri näyttää toimivan hyvin, mutta ei ole järkevä vaihtoehto korkeamman hinnan takia. Erona 50 kW ylimitoitukseen on, että hybridi-invertterit ovat pienemmillä jännitteillä parempia kuin vertailussa käytetyt stringi-invertterit. Toki tämä voi johtua siitä, että tässä vertailussa käytetyt stringi-invertterit eivät ole niin hyviä pienemmillä jännitteillä, mitä aiemmissa vertailuissa olleet stringi-invertterit. 850 V ja 800 V jännitteillä on taas huomattavissa 50 kW järjestelmässä nähty stringi-inverttien paremmuus. Ainoastaan aivan maksimaalisella teholla hybridi-invertterit pääsevät stringi-inverttien tasolle.



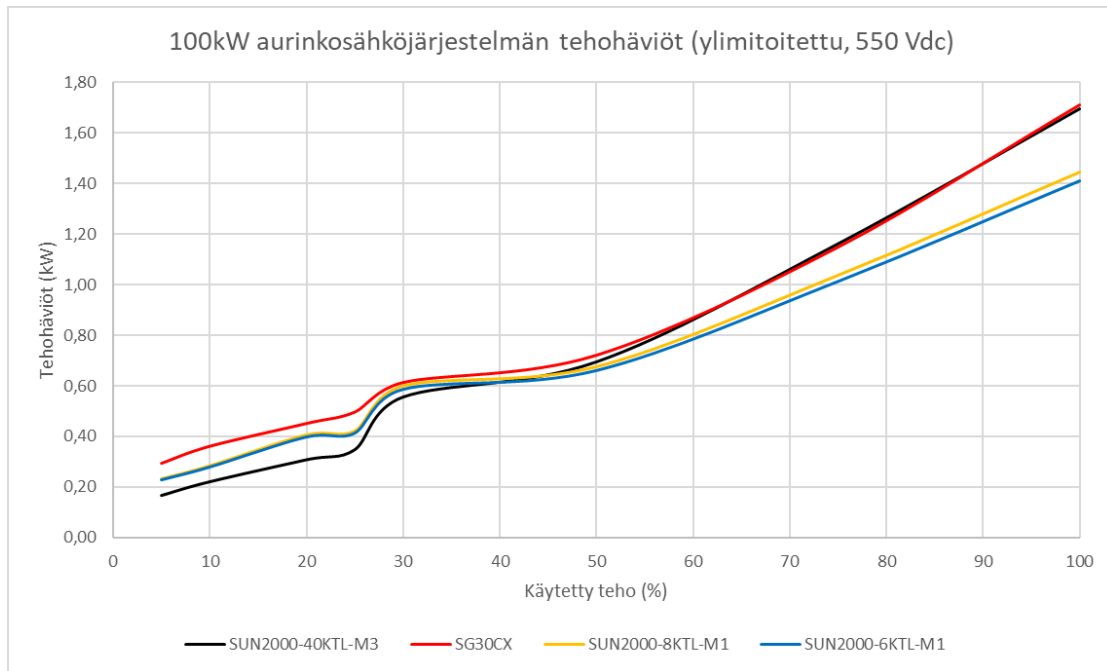
KUVA 27. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 28. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



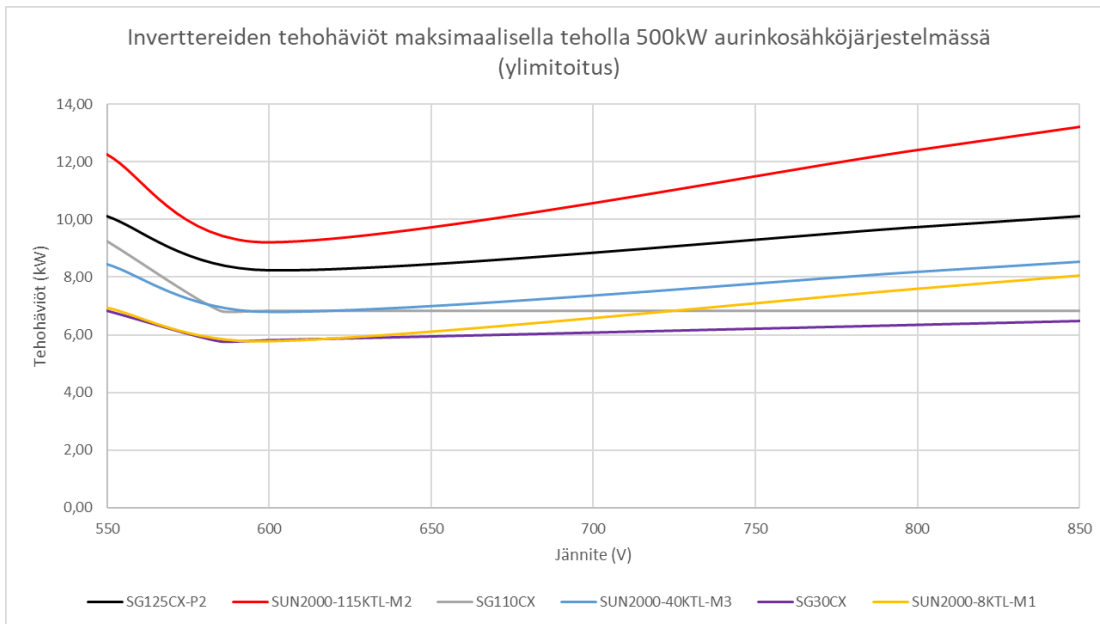
KUVA 29. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 30. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla 100 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

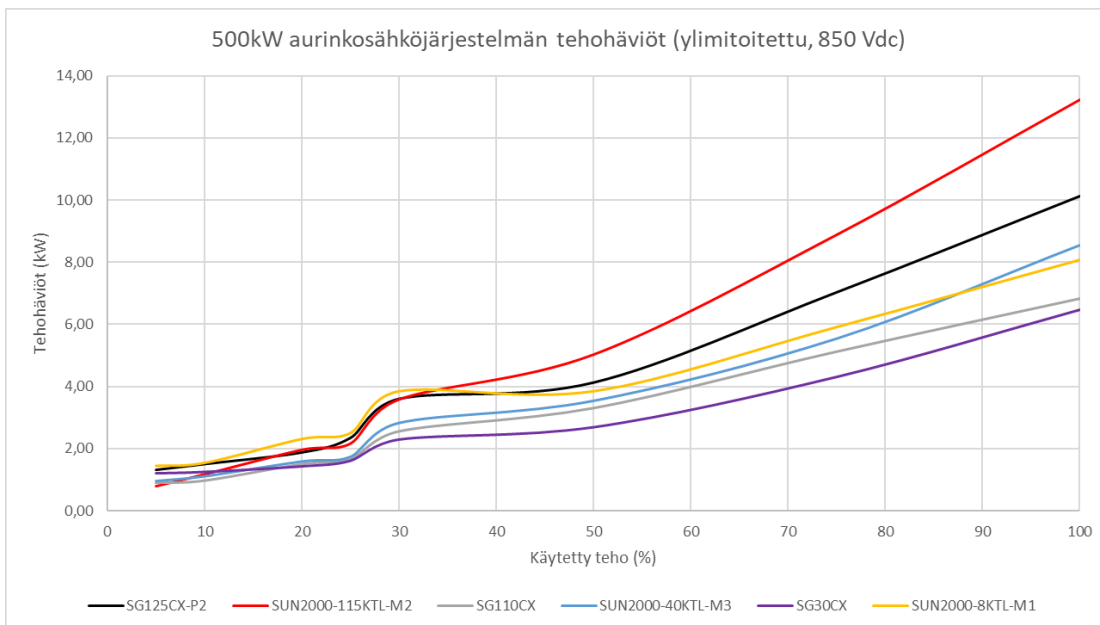
4.6 500 kW aurinkosähköjärjestelmä inverttereiden ylimitoituksella

500 kW aurinkosähköjärjestelmässä, missä invertterit on ylimitoitettu, on vertailussa kuusi invertteriä. Kuvassa 31 nähdään inverttereiden tehohäviöt maksimaalisella teholla välillä 550–850V. Tulos on odotettavasti samankaltainen kuin ilman ylimitoitusta. Inverttereiden tehohäviöt pienenevät, mutta hybridi-invertteri pärjää edelleen hyvin pienemmillä jännitteillä mutta heikkenee jännitteen noustessa. Tilanne on kuitenkin sama kuin 500 kW järjestelmässä ilman ylimitoitusta, eli pieniä hybridi-inverttereitä ei ole järkevää tähän asentaa moninkertaisen hinnan takia.

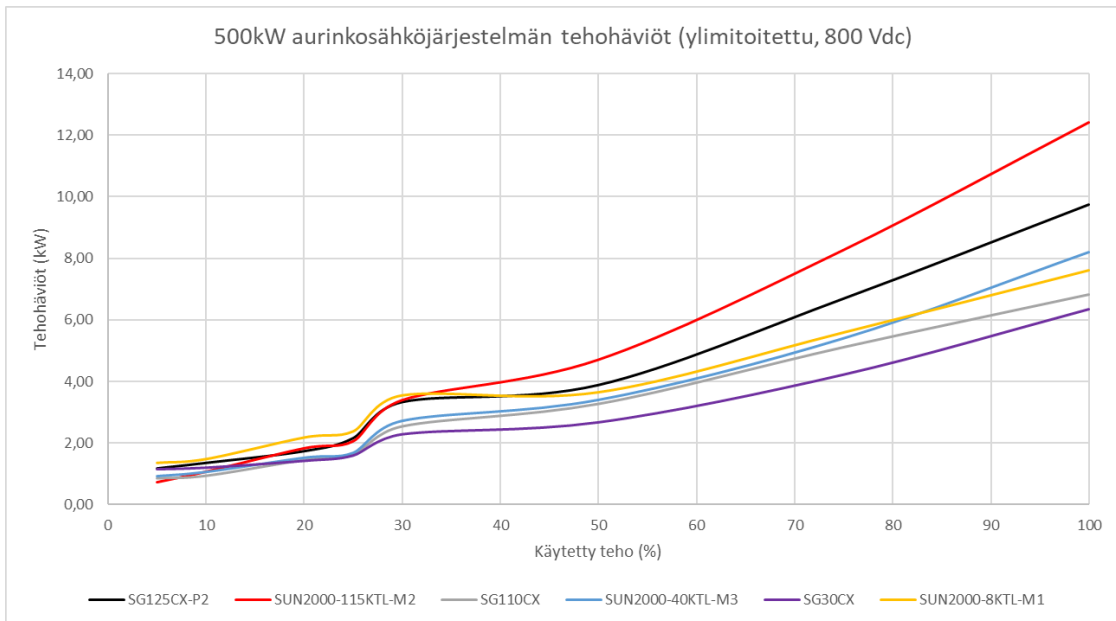


KUVA 31. Inverttereiden tehohäviöt eri jännitteillä 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä maksimaalisella teholla, kun invertterit on ylimitoitettu

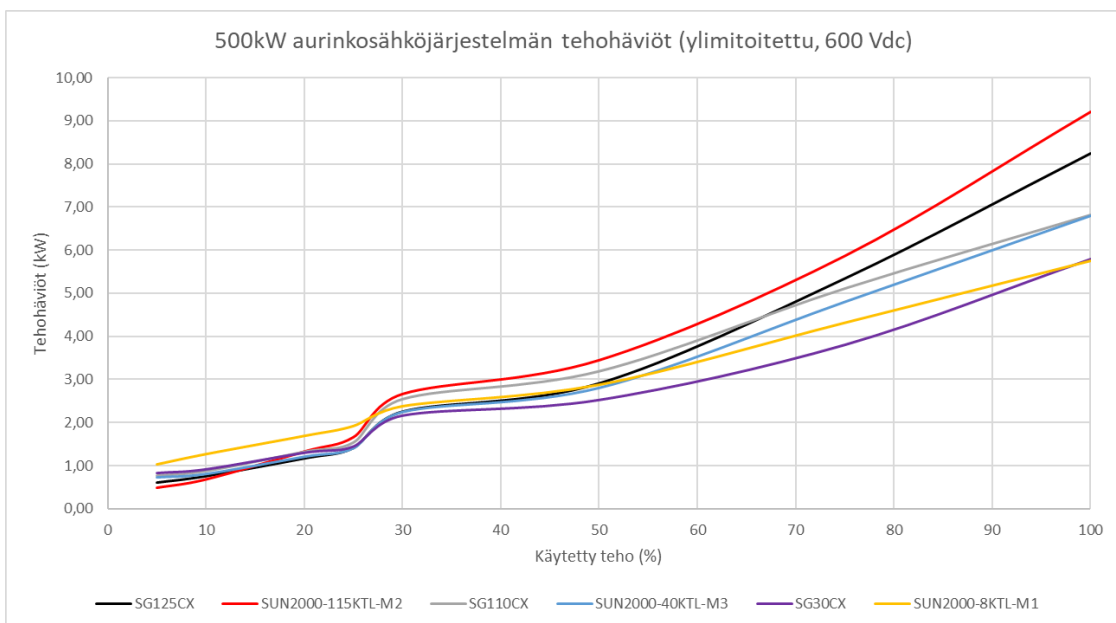
Kuvissa 32–35 ylimitoitettut invertterit on esitetty 5–100 % tehoilla. Jännitteet ovat väliltä 550–850V. Kuvista huomataan odotettu lopputulos, eli hybridi-invertterin heikkeneminen stringi-invertteriin verrattuna, kun jännite nousee.



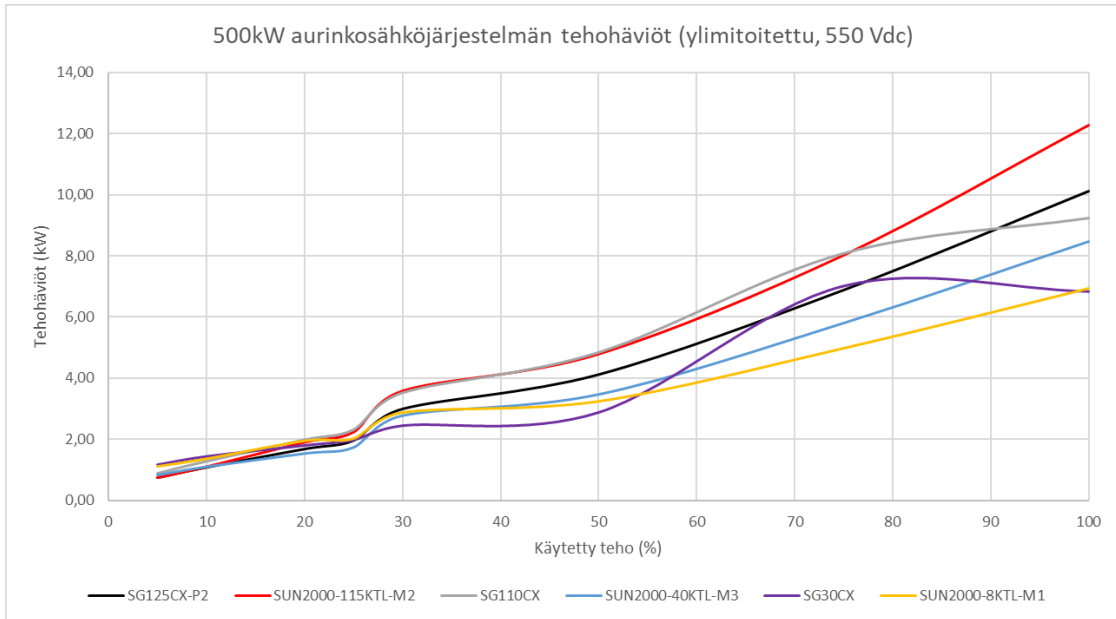
KUVA 32. Inverttereiden tehohäviöt 850 V tasavirralla 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 33. Inverttereiden tehohäviöt 800 V tasavirralla 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 34. Inverttereiden tehohäviöt 600 V tasavirralla 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 35. Inverttereiden tehohäviöt 550 V tasavirralla 500 kW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitu

5 ERILAISTEN INVERTTEREIDEN VAIKUTUS AURINKOPUISTOJEN AURINKOSÄHKÖN TUOTANTOON

Invertterit voivat olla aurinkosähköjärjestelmässä joko hajautettuna tai keskitettynä. Hajautettu järjestelmä on käytössä pienemmän kokoluokan aurinkovoimaloissa, kuten rakennusten katoilla ja pienemmissä aurinkopuistoissa. Hajautetuissa järjestelmissä voidaan käyttää muun muassa stringi-invertteriä, mikroinvertteriä sekä hybridi-invertteriä, mistä stringi-invertteri on käytetyin vaihtoehto. Puolestaan mikroinvertteriä tämän kokoluokan järjestelmissä ei käytetä muun muassa sen hinnan ja asentamistyylin takia, vaikka teknisesti sitä voitaisiin käyttää. Yleisesti hajautetut invertterit sopivat parhaiten järjestelmiin, missä olosuhteet vaihtelevat alueen eri osissa. Isomman kokoluokan aurinkovoimaloissa on käytössä keskitetyt invertterit eli keskusinvertterit. Keskitetty invertteri on paras vaihtoehto tarpeeksi homogeeniset olosuhteet omaavassa kohteessa. Keskitetyt invertterit sopivat hyvin esimerkiksi aavikolle tai muulle laajalle alueelle, missä aurinkopaneelit eivät kärsi varjostuksesta ja kaikki paneelit voidaan asentaa samaan suuntaan.

Aurinkopuistot ovat aurinkopaneeleilla varustettuja sähkövoimaloita, mitkä tuottavat sähköenergiaa laajalle alueelle. Mikäli aurinkopuisto halutaan hajauttaa, käytetään yleensä stringi-invertteriä. Toinen vaihtoehto on rakentaa keskitetty voimala, jolloin käytössä on keskusinvertteri. Inverttereiden vertailu suoritettiin käyttämällä kuvitteellisia 10 MW ja 100 MW aurinkopuistoja ja tutkimalla inverttereiden käytössä tulevia tehohäviöitä. Vertailussa ei siis ole otettu huomioon muita aurinkopuistossa syntyviä häviöitä eikä inverttereiden hintoja, vaan on puhtaasti keskitytty invertteriin ja sen tuottamiin häviöihin. Vertailussa käytettiin kahta keskusinvertteriä sekä kahta stringi-invertteriä. Keskusinvertterit olivat Gamesa Electricin Proteus PV 4700 sekä Siemensin Sinacon keskusinvertteri. Stringi-inverttereinä vertailussa käytettiin Sungrowin SG350HX sekä Huaweiin SUN2000-330KTL-H1 invertteriä.

Vertailu aloitettiin etsimällä inverttereitä, joista löytyy hyötysuhde jossain muodossa erilaisilla tehomäärillä. Tämä oli tärkeää, jotta saatiin tehtyä tarpeeksi dataa sisältävät taulukot ja käyrästä. Hyötysuhteet on katsottu Siemens Sinaconia lukuun ottamatta hyötysuhdekäyrältä, mutta arvot ovat siitä huolimatta tarpeeksi tarkkoja. Siemens Sinaconille oli annettu valmistajan puolesta arvot 5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 %, 75 % sekä 100 % tehoille. Kun oli löydetty inverttereitä, joiden tiedoista löytyi tarpeeksi kattavat tiedot hyötysuhteista, voitiin laskennat aloittaa. Ensimmäisenä

laskettiin, kuinka monta invertteriä tarvitaan kyseiseen aurinkopuistoon. Tarvittava inverttereiden määrä ilman invertterin ylitystä lasketaan AC-tehon perusteella kaavalla 4. Kaavassa 4 on esitetty esimerkkinä SG350HX invertterin kappalemäärän lasku. Kappalemääräksi esimerkkilaskelmassa saadaan 31,25, joten laitokseen tarvittaisiin maksimissaan 31 stringi-invertteriä.

$$n = \frac{\varnothing_{laitos}}{\varnothing_{invertteri}} \quad \text{KAAVA 4}$$

\varnothing_{laitos} = laitoksen teho (kW)

$\varnothing_{invertteri}$ = invertterin teho (kW)

$$n = \frac{10\,000\text{kW}}{320\text{kW}} = \mathbf{31,25}$$

Kappalemäärän ja hyötysuhteiden avulla voitiin seuraavana laskea, kuinka suuret tehohäviöt syntyvät eri suuruisilla tehoilla. Kaavassa 5 on esitetty tehohäviöiden laskenta ja esimerkkilaskelmana on käytetty SG350HX invertteriä 1300 V jännitteellä 100 % teholla.

$$P_{häviöt} = (100\% - \eta_{invertteri}) \times \varnothing_{invertteri} \times n \quad \text{KAAVA 5}$$

$P_{häviöt}$ = syntyvät tehohäviöt (kW)

$\eta_{invertteri}$ = invertterin hyötysuhde (%)

$\varnothing_{invertteri}$ = invertterin teho (kW)

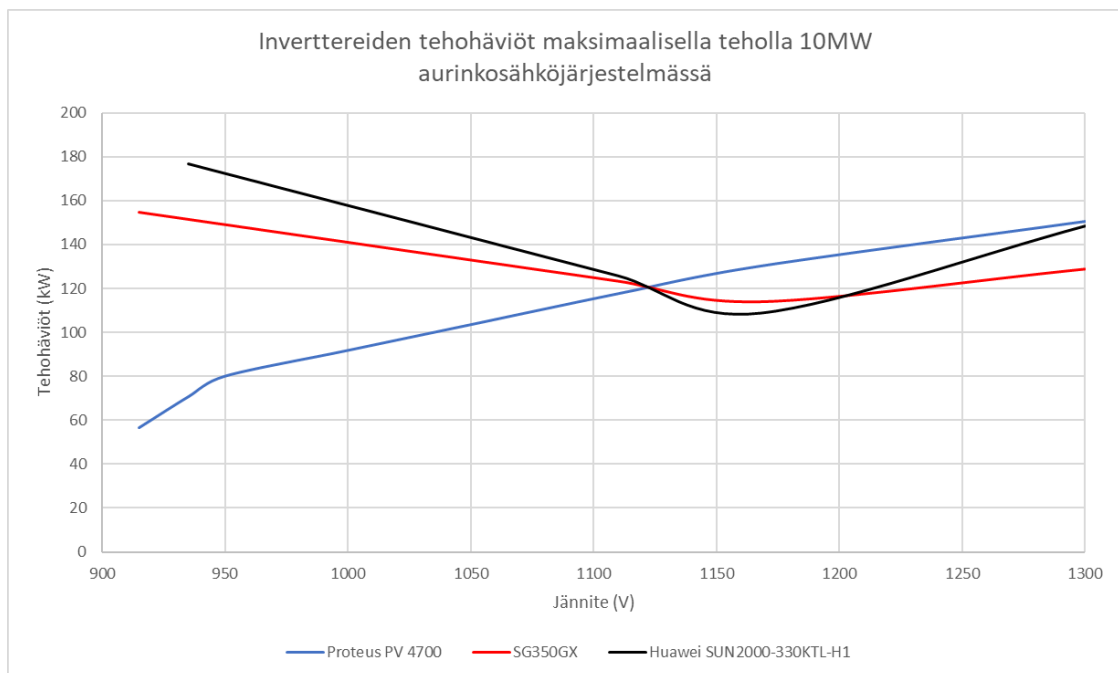
n = inverttereiden lukumäärä (kpl)

$$P_{häviöt} = (100\% - 98,7\%) \times 320\text{kW} \times 31 = \mathbf{128,96\text{kW}}$$

Tehohäviöiden laskemisen jälkeen voidaan piirtää käyrästä. Näissä kuvissa on esitetty kaikkien inverttereiden tehohäviöt yhteensä, jolloin voidaan hyvin nähdä, että mikä invertteri olisi paras. Inverttereiden tehohäviöt 10 MW ja 100 MW aurinkosähköjärjestelmissä ovat suhteessa samat ilman ylitystä, koska käytössä ovat samat invertterit. Tästä syystä 100 MW aurinkopuistosta esitetään ainoastaan ylityksen käyrästä. Inverttereiden suurin tasavirran arvo vertailussa oli 1300 V ja pienin 915 V.

5.1 10MW aurinkosähköjärjestelmä

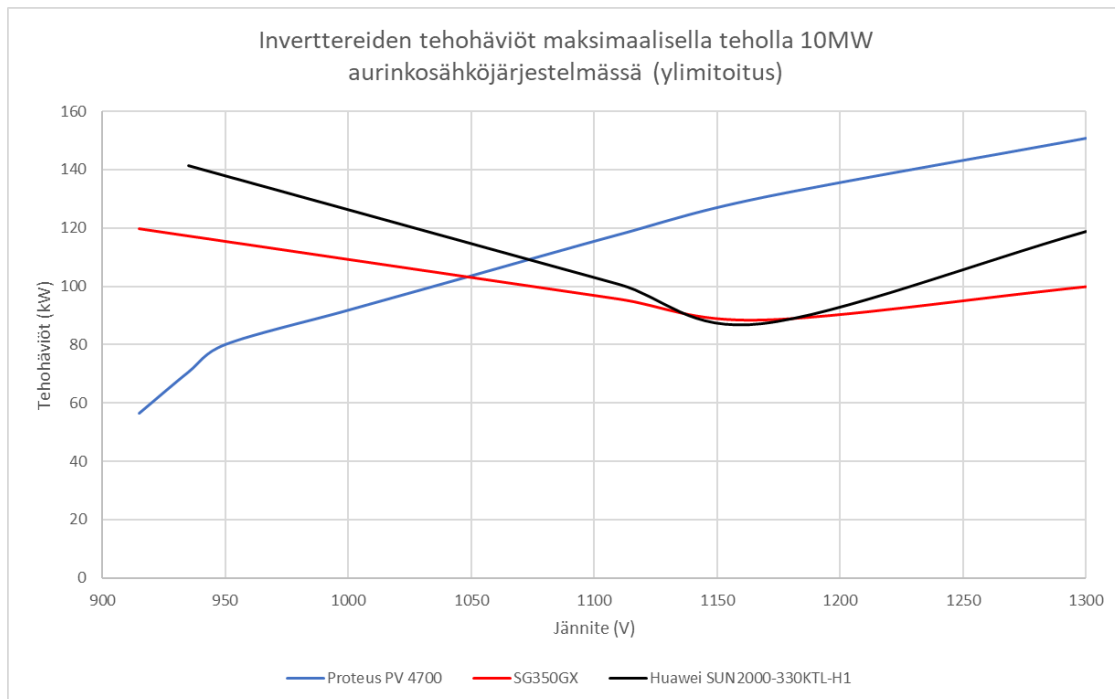
Kuvassa 36 on eri inverttereiden 100 % tehot eri voltimäärillä 10 MW kuvitteellisessa aurinkopuistossa ilman inverttereiden ylimitoitusta. Kuvasta 36 puuttuu Siemens Sinacon, koska kyseiselle invertterille löydettiin ainoastaan 1049 V arvot. Siemens Sinaconin 1049 V tehohäviöt ovat 130 kW. Tämän perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että mikäli laitoksen jännite on alle 1100 V, tuottaa keskusinvertteri vähemmän häviöitä täydellä teholla kuin stringi-invertteri. Kuvasta huomataan myös, että Huaweiin SUN2000-330KTL-H1 stringi-invertterin tehohäviöt nousevat 1150 V jälkeen todella jyrkästi, ja sen tehohäviöt ovat lähellä Proteus PV keskusinvertterin 1300 V häviöitä. Tämän ja muun kuvassa nähtävän perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että 1120–1300 V välillä stringi-invertterit tuottavat vähemmän häviöitä, mikäli aurinkopuisto toimii 100 % teholla, mutta häviöiden ero voi olla suuri tai erittäin pieni keskusinverttereihin verrattuna. Toki aurinkopuistoa rakennettaessa täytyy ottaa huomioon myös muut häviöt kuten esimerkiksi kaapelit, koska tässä vertailussa selvitettiin ainoastaan inverttereiden omat tehohäviöt.



KUVA 36. Inverttereiden tehohäviöt eri suuruisilla jännitteillä 100 % teholla ilman ylimitoitusta.

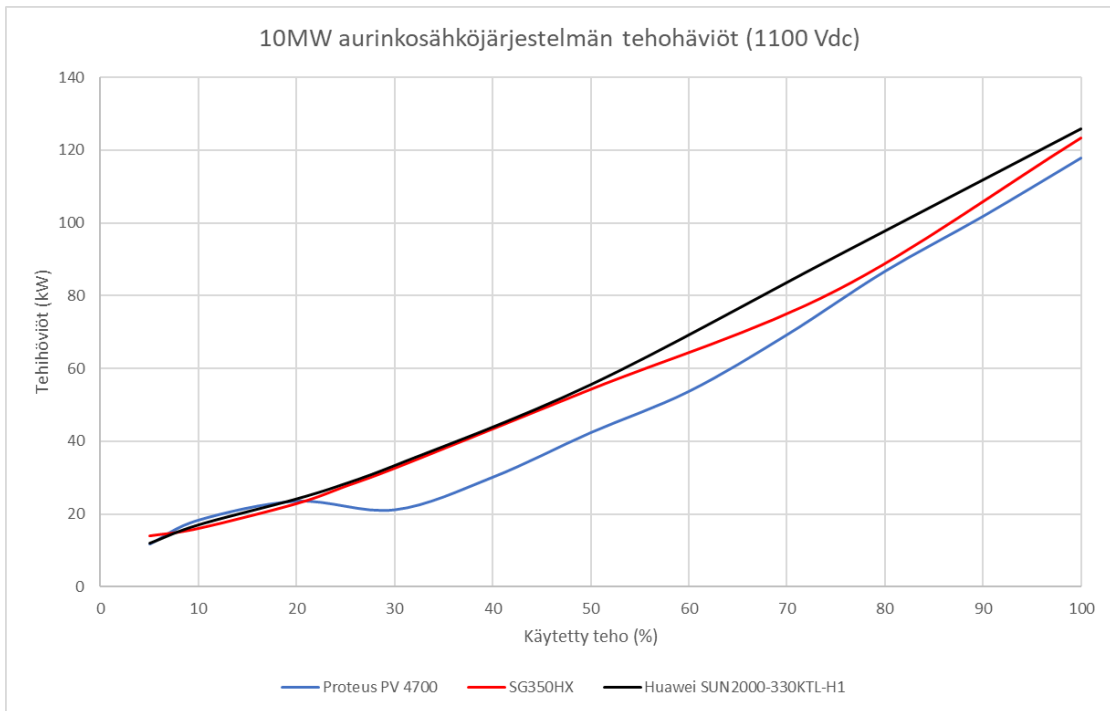
Kuvassa 37 on invertterit ylimitoitettu. Keskusinverttereitä ei tässä tapauksessa pystytä kuitenkaan ylimitoittamaan, koska käytössä on 5 MW keskusinvertterit. Tästä syystä ainoastaan stringi-invertterit on voitu ylimitoittaa. Kuvasta 37 huomataan, että mikäli stringi-invertterit pystytään ylimitoittamaan paremmin keskusinverttereihin verrattuna, alkaa stringi-invertterit olla parempia jo hiukan

pienemmällä jännitteellä. Keskusinvertteri on kuitenkin paljon parempi vaihtoehto vielä alle 1000 V jännitteillä.

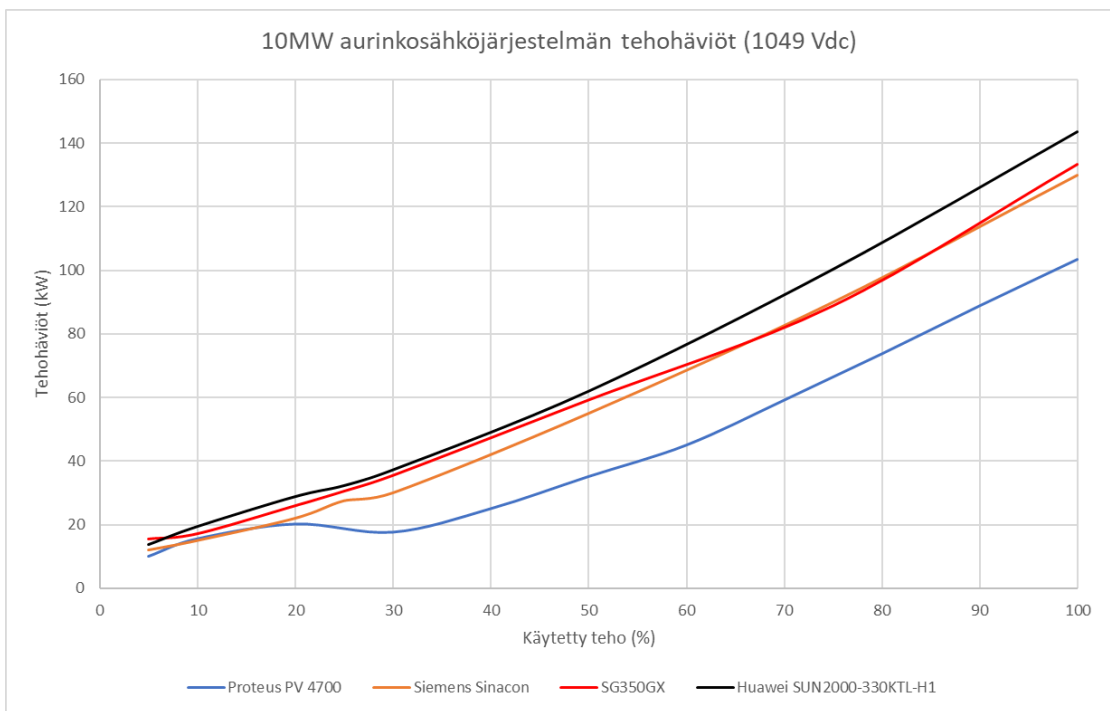


KUVA 37. Inverttereiden tehohäviöt eri suuruisilla jännitteillä 100 % teholla, kun stringi-invertterit on ylimitoitettu.

Kuten aiemmin mainittiin, vaikuttaa keskusinvertteri olevan parempi ratkaisu alle 1100 V tapauksissa, kun aurinkopuisto toimii 100 % teholla. Kuvissa 38 ja 39 nähdään tehohäviöt 5 %:sta 100 %:iin asti 1100 V ja 1049 V jännitteillä. Näissä kuvissa huomataan, että kun vain pieni osa maksimaalisesta tehosta on käytössä, on häviöiden erot pieniä ja 1100 V tapauksessa stringi-inverttereiden häviöt ovat jopa hiukan vähäisemmät. Tässä tapauksessa puhutaan kuitenkin todella pienistä tehoista, koska jo 20 % teholla stringi-inverttereiden tehohäviöt ovat viimeistään kasvaneet suuremmiksi.

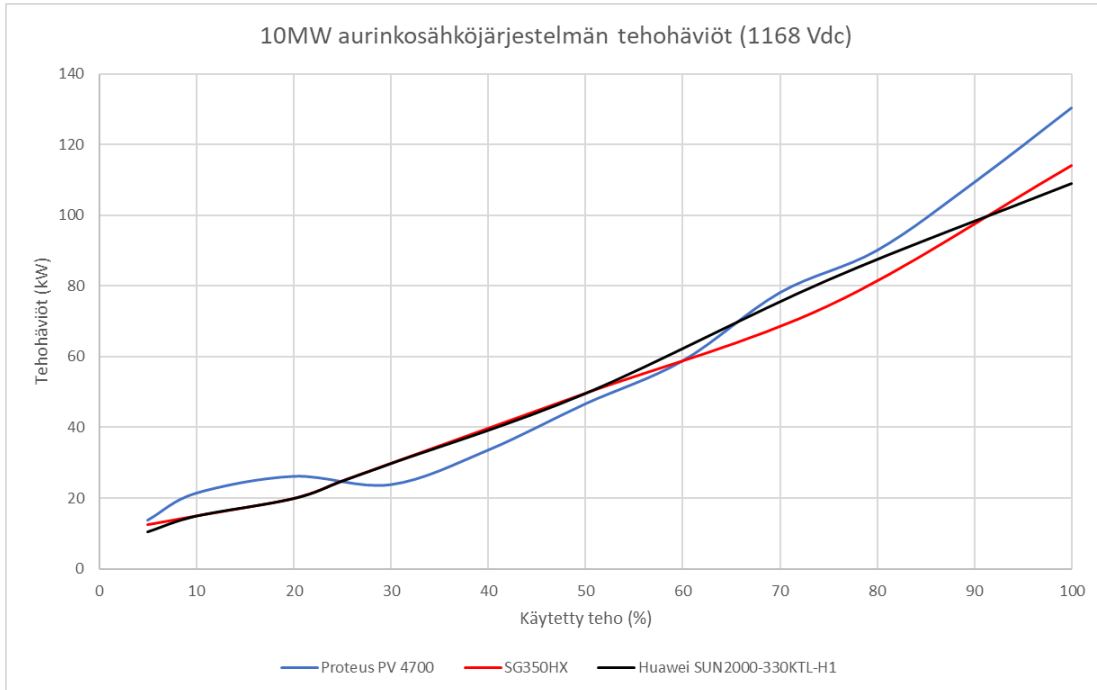


KUVA 38. Inverttereiden tehohäviöt 1100 V tasavirralla 10 MW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta



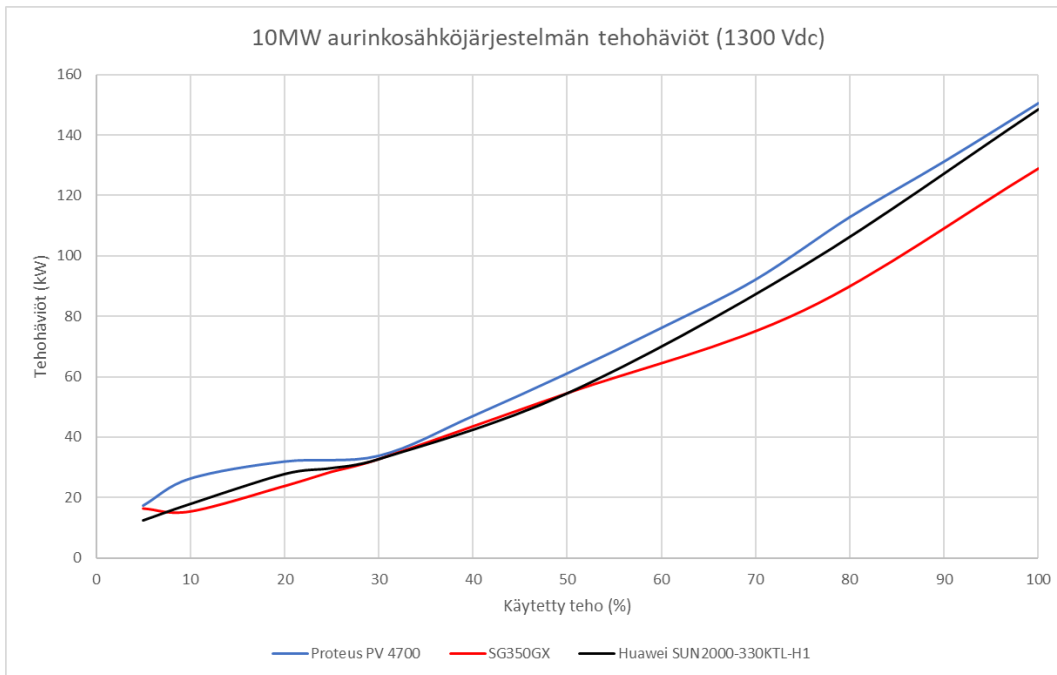
KUVA 39. Inverttereiden tehohäviöt 1049 V tasavirralla 10 MW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta

Kuvassa 40 on esitettyä inverttereiden tehohäviöt 1168 V tasavirralla. Kuvasta nähdään, että keskusinvertteri toimii vielä tietyllä tehovälillä paremmin, mutta 70–100 % teholla stringi-invertteri kuitenkin on jo parempi vaihtoehto. Tämän takia 1168 V tasavirtaa käytettäessä stringi-invertteri on jo parempi vaihtoehto.



KUVA 40. Inverttereiden tehohäviöt 1168 V tasavirralla 10MW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta

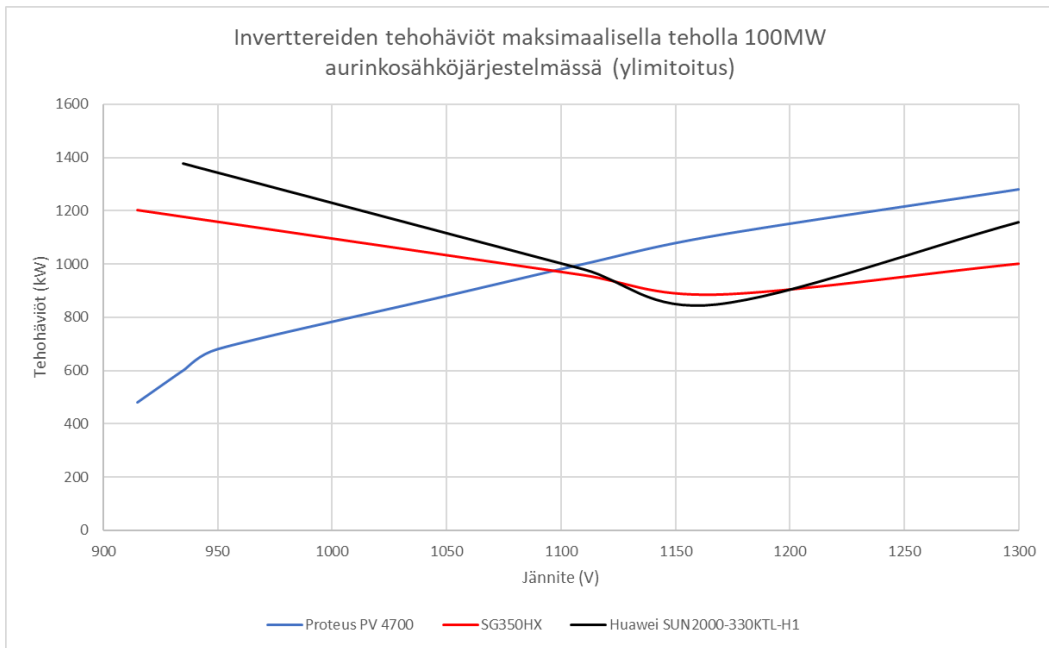
Kuvassa 41 nähdään invertterit vielä 1300 V tasavirralla. Kuvasta nähdään, että stringi-invertteri on tässä kohtaa parempi vaihtoehto kaikensuuruisilla tehoilla.



KUVA 41. Inverttereiden tehohäviöt 1300 V tasavirralla 10 MW aurinkosähköjärjestelmässä ilman ylimitoitusta

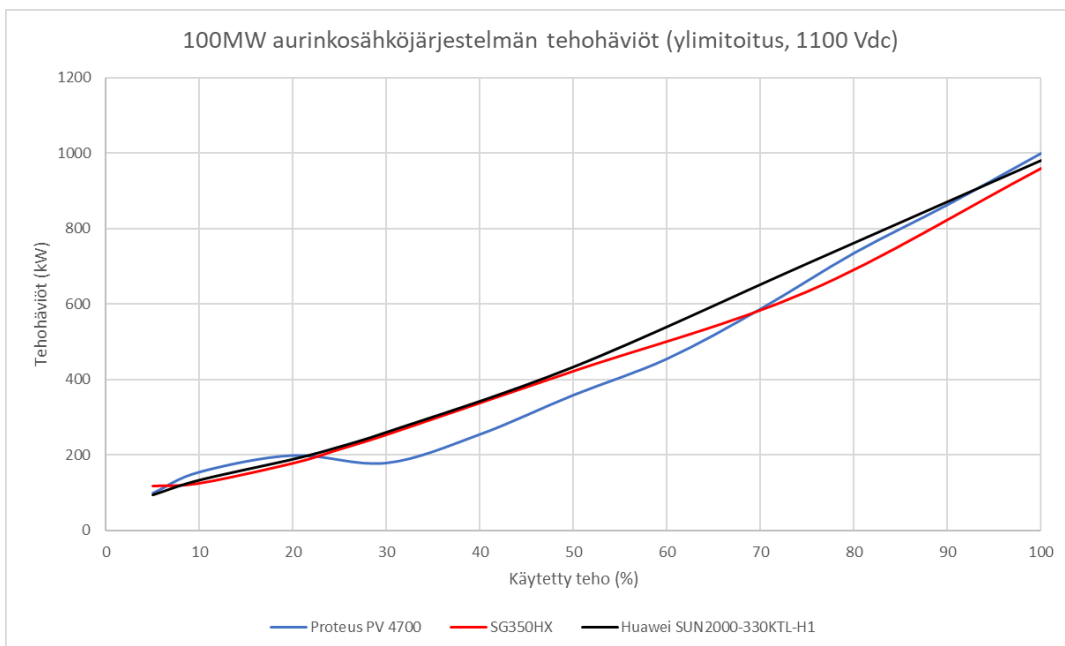
5.2 100 MW aurinkosähköjärjestelmä

Tässä kappaleessa käydään läpi inverttereiden tehohäviöitä 100 MW aurinkosähköjärjestelmässä. Kuten aiemmin todettiin, tässä kappaleessa esitetään ainoastaan tehohäviöt, kun invertterit on ylimitoitettu. Kuvassa 42 on esitetty inverttereiden tehohäviöt eri suuruisilla jännitteillä. Kuvasta huomataan, että stringi-invertteri muuttuu tehokkaammaksi jo hiukan alemmalla jännitteellä verrattuna tilanteeseen, jossa inverttereitä ei olla ylimitoitettu. Kun otetaan huomioon, että Siemens Sinaconin tehohäviöt 1049 V tasavirralla ovat 1,04 MW, voidaan todeta, että alle 1050 V tasavirralla keskusinvertterit ovat todennäköisesti tehokkaampia vaihtoehtoja. Kun jännite on yli 1100 V, stringi-invertterit ovat tehokkaampia kuin keskusinvertterit. Tämän perusteella voidaan todeta, että inverttereiden ylimitoituksella saadaan tehohäviöt jopa paljon pienemmiksi, mutta inverttereiden voimasuhteet pysyvät lähellä samaa.



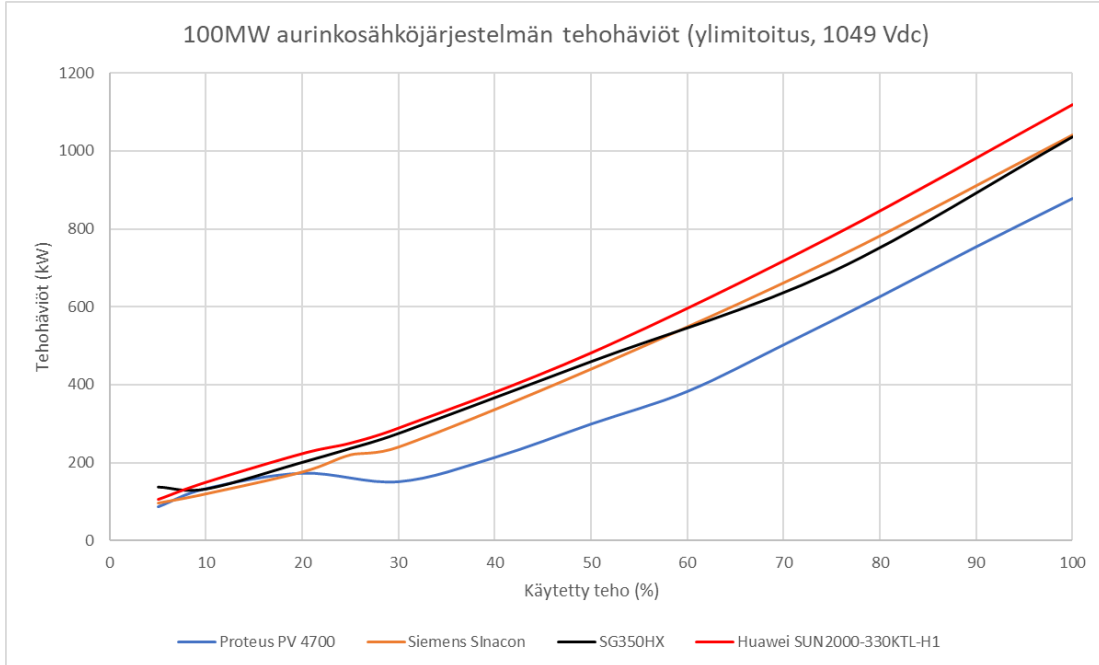
KUVA 42. Inverttereiden tehohäviöt eri suuruisilla jännitteillä 100 % teholla, kun invertterit on ylimitoitettu.

Kuvissa 43 ja 44 nähdään tehohäviöt 1100 V ja 1049 V tasavirralla. Näistä kuvista nähdään inverttereiden häviöitä tarkemmin hyvistä kohdista. Kohdat ovat hyviä, koska molemmat jännitteet vaikuttaisivat olevan yhdenlaisia rajakohtia, missä inverttereiden häviöt ovat lähellä toisia. Kuvassa 43 huomataan, että 1100 V jännitteellä keskusinvertteri on matalammilla tehoilla hiukan parempi, mutta 70–100 % tehoilla stringi-invertteri muuttuu tehokkaammaksi.



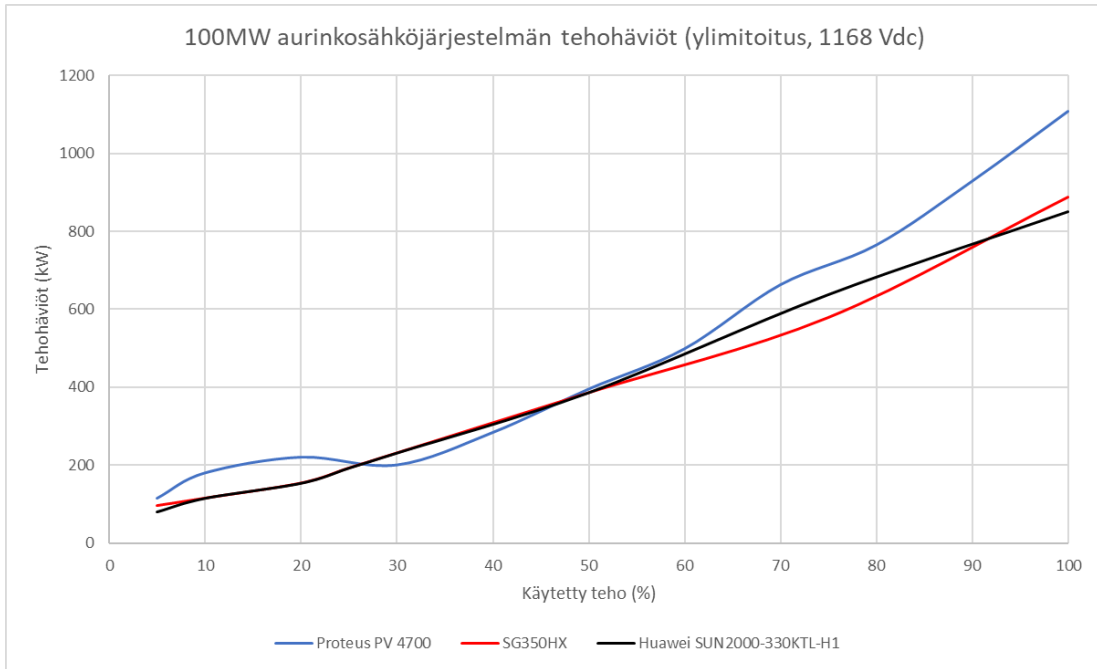
KUVA 43. Inverttereiden tehohäviöt 1100 V tasavirralla 100 MW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

Kuvassa 44 on inverttereiden tehohäviöt 100 MW järjestelmässä 1049 V tasavirralla. Kuvassa Siemensin Sinacon keskusinvertteri on vielä tasoissa Sungrowin SG350HX stringi-invertterin kanssa, mutta jännitteen laskiessa myös Sinacon tuottaa vähemmän tehohäviöitä kuin stringi-invertterit.

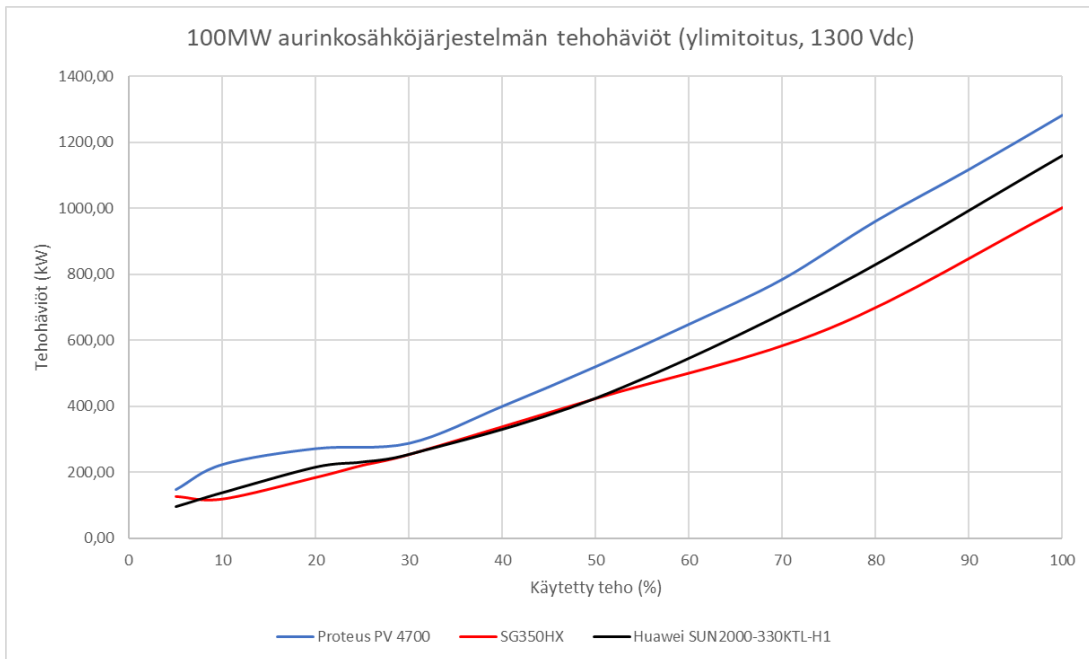


KUVA 44. Inverttereiden tehohäviöt 1049 V tasavirralla 100 MW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

Kuvissa 45 ja 46 on esitettyä inverttereiden tehohäviöt 1168 V ja 1300 V jännitteillä. Näissä kuvissa huomataan, että stringi-invertterit ovat parempi vaihtoehto, kun jännite nousee.



KUVA 45. Inverttereiden tehohäviöt 1168 V tasavirralla 100 MW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu



KUVA 46. Inverttereiden tehohäviöt 1300 V tasavirralla 100 MW aurinkosähköjärjestelmässä, kun invertterit on ylimitoitettu

6 TULOKSET JA YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli erilaisten inverttereiden vaikutus teollisen aurinkovoiman sähköntuotantoon. Työssä vertailtiin erilaisten inverttereiden tuottamia tehohäviöitä eri kokoisissa kuvitteellisissa aurinkovoimaloissa. Inverttereiden kulut otettiin huomioon vasta lopputuloksissa, jotta vertailusta saatiin selkeä. Kuvitteellisia aurinkosähköjärjestelmiä oli viisi, joista kolme oli teollisia kiinteistöjä ja kaksi aurinkopuistoja. Teolliset kiinteistöt olivat kooltaan 50 kW, 100 kW sekä 500 kW ja aurinkopuistot 10 MW ja 100 MW. Teollisten kiinteistöjen vertailuissa käytettiin stringi-inverttereitä ja hybridi-inverttereitä. Aurinkopuistojen vertailuissa käytettiin stringi-inverttereitä sekä keskusinverttereitä ja selvitettiin että onko hajautettu vai keskitetty aurinkosähköjärjestelmä parempi vaihtoehto. Kyseisissä aurinkosähköjärjestelmissä voitaisiin teknisesti käyttää myös mikroinverttereitä, mutta ne eivät ole järkevä vaihtoehto korkeampien kulujen ja työläämmän asennuksen takia.

Teollisten kiinteistöjen vertailussa käytettiin 500 Wp paneeleita kuvitteellisissa laitoksissa. Vertailussa huomattiin, että hybridi-invertteri on tehohäviöiden osalta hyvä vaihtoehto matalammilla jännitteillä stringi-invertterille, joka on suosituin invertteri. Hybridi-invertteriä ei kuitenkaan kannata käyttää muissa kuin 50 kW aurinkosähköjärjestelmissä korkeampien kulujen vuoksi. Stringi-inverttereistä löytyy paremmin vaihtoehtoja korkeammilla inverttereiden tehoilla, minkä takia niiden kulut jäävät pienemmiksi. Teollisissa kiinteistöissä ei ollut invertterivalinnalle väliä sillä, onko inverttereitä ylimitoitettu vai ei. Inverttereiden tehohäviöt ainoastaan pienenevät, kun invertterit ylimitoitetaan.

Aurinkopuistojen vertailuissa selvitettiin parempaa vaihtoehtoa hajautetun ja keskitetyn aurinkosähköjärjestelmän väliltä. Vertailuissa huomattiin, että keskusinvertterit toimivat paremmin matalammilla jännitteillä. Jännitteen ollessa yli 1100 V on stringi-invertteri tehohäviöllisesti parempi vaihtoehto sekä ylimitoituksella että ilman ylimitoitusta. 10 MW aurinkopuistolle tehtiin vertailu, missä ainoastaan stringi-invertterit ylimitoitettiin. Tässä tapauksessa keskusinvertterit olivat parempi vaihtoehto alle 1000 V jännitteellä. Tämän perusteella voidaan luotettavasti sanoa, että mikäli aurinkosähköjärjestelmä toimii alle 1000 V jännitteellä, on keskusinvertteri oikea valinta, jos olosuhteet ovat hyvät. 100 MW aurinkopuistoon on tehty vertailu, missä kaikki invertterit on ylimitoitettu. Tuloksista huomataan, että keskusinvertteri on tehokkaampi alle 1050–1100 V jännitteellä, riippuen invertteristä. Kaiken edellä mainitun tiedon pohjalta voidaan todeta, että erilaiset ylimitoitukset tai invertterien käyttäminen ilman ylimitoitusta ei juurikaan vaikuta rajakohtaan, missä stringi-

invertteri alkaa olemaan parempi vaihtoehto. Riippumatta mitoituksista on 1000–1100 V välillä rajakohta, minkä yläpuolella stringi-invertteri on parempi vaihtoehto ja alapuolella puolestaan keskusinvertteri.

Työn aihetta voisi jatkotutkimuksessa selvittää lisää käyttämällä aurinkovoimalaa, jonka rakentamista suunnitellaan. Kun käytössä olisi suunnitteilla oleva aurinkovoimala, olisi tiedossa alueen olosuhteet, mikä selkeyttäisi invertterin valintaa. Tässä tapauksessa voisi vertailussa ottaa huomioon erilaiset kulut, kaapeleista syntyvät häviöt sekä muut aurinkovoimalassa syntyvät häviöt. Nämä asiat ovat kuitenkin myös olennainen osa aurinkovoimalaa.

LÄHTEET

1. Motiva 2023. Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Hakupäivä 13.6.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma.
2. Motiva 2022. Aurinkosähkötöknologiat. Hakupäivä 13.6.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat.
3. Solarvoima Oy. Miten aurinkopaneeli toimii. Hakupäivä 9.8.2023. <https://solarvoima.fi/miten-aurinkopaneeli-toimii/>.
4. Forbes 2022. Solar panel size and weight: a comprehensive guide. Hakupäivä 9.8.2023. <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-panel-size-weight-guide/>.
5. Energy Theory 2023. How many volts does a solar panel produce. Hakupäivä 9.8.2023. <https://energytheory.com/how-many-volts-does-a-solar-panel-produce/>.
6. Aurinkovirta.fi 2023. Invertteri. Hakupäivä 14.6.2023. <https://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkovoimala/invertteri/>.
7. International Finance Corporation 2015. Utility - Scale Solar Photovoltaic Power Plants. Hakupäivä 12.6.2023. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report_Web+08+05.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG.
8. Stapleton Geoff & Neill Susan. 2012. Grid-connected solar electric systems.
9. Enfigar Oy 2022. Lataussäätimet. Hakupäivä 30.6.2023. <https://eroaverkosta.com/page/11/lataussaatimet>.
10. DS New Energy 2020. Aurinko mikroinvertteri, merkkijono-invertteri ja keskusinvertteri. Hakupäivä 22.6.2023. <https://fi.dsnsolar.com/info/micro-inverter-string-inverter-and-central-in-44718963.html>.

11. Solar Power World 2015. What is a combiner box. Hakupäivä 13.11.2023. <https://www.solar-powerworldonline.com/2015/06/what-is-a-combiner-box/>
12. SolarReviews 2021. What are string inverter systems. Hakupäivä 30.6.2023. <https://www.solarreviews.com/blog/complete-guide-to-string-inverters>.
13. Energy Theory 2023. 5 Major Disadvantages of Hybrid Inverter. Hakupäivä 27.6.2023. <https://energytheory.com/5-major-disadvantages-of-hybrid-inverter/>.
14. Greenprophet 2022. 3 Pros And Cons Of Hybrid Solar Inverters. Hakupäivä 27.6.2023 <https://www.greenprophet.com/2022/05/hybrid-solar-inverter/>.
15. SolarReviews 2022. What are DC power optimizers. Hakupäivä 30.6.2023. <https://www.solar-reviews.com/blog/complete-guide-to-power-optimizers>.