



Keskitetty suojaus aurinkosähkön pientuotannossa

Jani Raami

Opinnäytetyö, AMK

Maaliskuu 2022

Tekniikan ala

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma | Insinööri (AMK)

Raami, Jani

Keskitetty suojaus aurinkosähkön pientuotannossa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Maaliskuu 2022, 44 sivua.

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Sähkön pientuotantolaitteistoa liitettäessä osaksi valtakunnallista sähköverkkoa tulee huomioida lukuisia eri teknisiä vaatimuksia, jotka määräytyvät standardien ja vaatimuskäytäntöjen sisällön mukaan. Pientuotannon suojausasetteluiden osalta Suomessa on aiemmin käytetty saksalaista VDE-AR-N 4105 -vaatimuskäytäntöä. Kyseinen dokumentti ei ole standardi ja näin ollen dokumentin suojausasetteluista ollaankin Suomessa ja muissa EU-maissa luopumassa. VDE-vaatimuskäytännön tilalla tullaan käyttämään tulevaisuudessa standardisarjaa SFS-EN 50549, johon suositellaan siirtymään vuoteen 2023 mennessä. Muutoksen myötä 50–1000 kW tuotantolaitoksille tulee vaatimuksena erillinen keskitetty suojaus.

Opinnäytetyöllä pyrittiin löytämään toimeksiantajalle Solarigo Systems Oy:lle yhdenmukainen linja erillisen keskitetyn suojausjärjestelmän toteutukseen standardin SFS-EN 50549-1:2019 ja Energiateollisuus ry:n teettämän Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen mukaisesti tapauksissa, joissa liittymispisteen taakse on kytketty laitteisto kahdella tai useammalla invertterillä tai vain yhdellä invertterillä. Lisäksi pyrittiin selvittämään verkkoyhtiöiden vaatimia toteutustapoja LoM-suojausjärjestelmän osalta, kun käytössä on erillinen keskitetty suojauslaitteisto.

Opinnäytetyön tutkimus toteutettiin laadullisena tutkimuksena, jonka aineistonkeruumenetelminä käytettiin sähköpostitse käytyjä puolistrukturoituja teemahaastatteluita sekä dokumentteja, kuten standardeja. Sähköpostihaastatteluihin kutsuttiin asiantuntijoita eri jakeluverkkoyhtiöistä ja Energiateollisuus ry:stä. Asiantuntijoiden vastauksia vertailtiin toisten asiantuntijoiden vastausten sekä olemassa olevan teorian välillä.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että liitännäsuojaus tulee toteuttaa aina erillisellä keskitetyllä suojauslaitteella, kun tuotantolaitteiston tuotantoteho on yli 50 kW. Tutkimuksen tuloksista ei kuitenkaan voitu yksiselitteisesti todeta, täytyykö erillisen keskitetyn suojauslaitteen ohjata vain yhtä kytkinlaitetta, vaikka se olikin enemmistön kanta. LoM-suojausta suositellaan jakeluverkkoyhtiöstä riippumatta sisällyttämään keskitettyyn suojausjärjestelmään, kun käytetään passiivimetodeja. Osa verkkoyhtiöistä puolestaan vaati LoM-suojausjärjestelmän sisällyttämistä keskitettyyn suojausjärjestelmään. LoM-suojaus voidaan integroida inverttereihin käytettäessä aktiivimetodeja.

Avainsanat (asiasanat)

Aurinkosähkö, pientuotanto, keskitetty suojaus, tuotantolaitteisto, LoM-suojaus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Raami, Jani

Interface protection in small-scale solar power generation

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, March 2022, 44 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Electrical and Automation Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

When connecting small-scale electricity generation to be a part of the national grid, numerous technical requirements must be taken into account. The requirements are determined by the content of standards and requirement documents. As for protection settings of small-scale production in Finland has formerly been used the German application rule VDE-AR-N 4105. This application rule is not a standard and therefore the document's protection settings are being renounced in Finland and other EU countries. In the future, the standard series SFS-EN 50549 will be used instead of the VDE application rule, which is recommended to be switched to by 2023. Along the change, the 50–1000 kW generating plants are required to have external interface protection.

The aim of the thesis was to find a consistent guideline for the client Solarigo Systems Oy to implement external interface protection in accordance with standard SFS-EN 50549-1: 2019 and the Technical Requirements for Small Electricity Generation commissioned by the Finnish Energy. The guideline concerned cases where generating plant is connected to point of connection with two or more inverters or only one inverter. Additionally, the aim was to clarify the implementation methods required by the distribution system operator for LoM protection when an external interface protection device is used.

The research of the thesis was implemented as a qualitative research. The material was collected via e-mail sent semi-structured thematic interviews and from documents such as standards. Experts from various distribution system operator and Finnish Energy were invited for e-mail interviews. The answers of the experts were compared between the answers of other experts and the existing theory.

The results of the research showed that the interface protection must always be implemented with external interface protection device when the production capacity of the generating plant exceeds 50 kW. However, it is not possible to unequivocally ascertain from the results of the research whether an external interface protection device must control only one switching device, even though it was the stand of the majority of respondents. It is recommended to include LoM protection in the interface protection relay when using passive methods, regardless of the distribution system operator. On the other hand, part of the distribution system operators requires the LoM protection to be included in the interface protection relay. LoM protection can be integrated into inverters when using active methods.

Keywords/tags (subjects)

Solar power, small-scale production, interface protection, generating plant, LoM protection

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Opinnäytetyön tausta ja rajaukset.....	3
1.2	Toimeksiantaja	4
2	Tutkimusasetelma	4
2.1	Tutkimusongelma- ja kysymykset	4
2.2	Tutkimusmenetelmä	5
2.3	Tutkimuksen luotettavuus	7
3	Aurinkosähköjärjestelmä	8
3.1	Aurinkosähkön pientuotanto	9
3.2	Aurinkovoimalan osat ja toimintaperiaate	9
3.2.1	Aurinkopaneelit	10
3.2.2	Invertteri	12
3.2.3	Kaapelointi	16
4	Aurinkosähköjärjestelmän suojaus	17
4.1	Suojalaitteet ja suojaustoiminnot	18
4.1.1	Erotuslaitteet	18
4.1.2	Tasasähköpiirin ja paneeliston suojaukset	19
4.1.3	Invertteriin integroidut suojaukset.....	21
4.1.4	Saarekekäytön esto ja Loss of Mains -suojaus	21
4.1.5	Vaihtosähköpiirin suojaukset	23
4.1.6	Maadoitus ja potentiaalintasaus	24
4.2	Keskitetty suojaus	24
5	Verkkoon kytkeytyminen ja irtoaminen	26
6	Tutkimuksen toteutus ja tulokset	28
6.1	Tutkimuksen toteutus käytännössä	28
6.2	Tutkimuksen tulokset.....	29
7	Johtopäätökset	30
8	Pohdinta	32
	Lähteet	35
	Liitteet	39
	Liite 1. Suositeltavat tuotantolaitteistojen tekniset vaatimukset.....	39

Kuviot

Kuvio 1. Jakeluverkon kanssa rinnan kytketyn aurinkosähköjärjestelmän kokoonpano	10
Kuvio 2 Yleisimmät aurinkopaneelityypit	11
Kuvio 3. Mikroinvertterin kytkennän periaate	13
Kuvio 4. Ketjuinvertterin kytkennän periaate.....	14
Kuvio 5. Keskusinvertterin kytkennän periaate	15
Kuvio 6 Aurinkopaneelin maksimitehopiste kuvaajassa.....	16
Kuvio 7 Saarekekäytön havaitsemisen menetit.....	22
Kuvio 8 Esimerkki jakeluverkkoon liitetyn tuotantolaitoksen kytkennästä keskitetyllä suojauksella	25

Taulukot

Taulukko 1 Yleisimpien kennotyyppien ominaisuuksien vertailu.....	11
Taulukko 2 Aurinkosähköjärjestelmältä vaadittavat erotuslaitteet tasasähköpuolella.....	19
Taulukko 3 Tuotantolaitoksen suojauksen toiminta-ajat ja asetteluarvot.....	26
Taulukko 4 Tuotantolaitoksen asetteluarvot normaalikäynnistymisessä ja automaattisen jälleenkytkennän jälkeen	27

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta ja rajaukset

Voimakkaasti viime vuosina esiin noussut huoli ilmastonmuutoksesta on ajanut niin yksityishenkilöt kuin yrityksetkin miettimään omaa toimintaansa energiankulutuksen osalta. Ihmisillä on yhä enenevässä määrin halukkuutta ja varaa investoida uusiutuvaan energiaan ja näin ollen vaikuttaa omaan hiilijalanjälkeensä. Etenkin yksityishenkilöt haluavat samalla pienentää sähkölaskuaan ja yritykset siinä ohessa parantaa imagoaan. Toistaiseksi ainakin Suomessa tähän annetaan erinomaiset mahdollisuudet erilaisten tukien ja verovapautusten avulla. Yhtenä yleisimmistä konkreettisista tavoista pienentää hiilijalanjälkeä on sijoittaa omaan pientuotantolaitteistoon.

Kun sähkön pientuotantolaitteistoa liitetään osaksi valtakunnallista sähköverkkoa, tulee huomioida lukuisia eri teknisiä vaatimuksia, jotka määräytyvät standardien ja vaatimusdokumenttien sisällön mukaan (Heikkilä 2021, 1). Suomessa noudatettavan Fingridin VJV2018 -vaatimusdokumentin mukaan ”liittymispisteen verkonhaltijan on määriteltävä sähköverkon suojaamiseksi tarvittavat järjestelmät ja niiden asetukset, ottaen huomioon voimalaitoksen ominaisuudet” (Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2018, 39). Suomessa on 77 sähköverkkoluvallista jakeluverkonhaltijaa (Verkkotoiminnan luvanvaraisuus n.d.). Verkonhaltijoiden suuresta määrästä ja heidän määrittelyistään johtuen, eri puolilla Suomea voi olla vaihtelevia toimintatapoja voimaloiden suojauksissa, mikä tuo suunnittelijan työhön paljon muuttujia, epävarmuutta ja ennen kaikkea lisää työtunteja.

Pientuotannon suojausasetteluiden osalta Suomessa on aiemmin käytetty saksalaista VDE-AR-N 4105 -vaatimusdokumenttia. Kyseinen dokumentti ei ole standardi ja näin ollen dokumentin suojausasetteluista ollaankin Suomessa ja muissa EU-maissa luopumassa. VDE-vaatimusdokumentin tilalla tullaan käyttämään tulevaisuudessa standardisarjaa SFS-EN 50549, joka on hyväksytty ja voimassa. Muutoksen myötä 50–1000 kW tuotantolaitoksille erillisenä lisävaatimuksena tulee erillinen keskitetty suojaus ja ROCOF-suojauksen käyttökielto. Suositeltu siirtymäaika on vuoden 2022 loppuun mennessä, jonka jälkeen verkkoon ei suositella kytkettävään enää tuotantolaitteistoja, jotka ovat VDE-AR-N 4105 -vaatimusdokumentin mukaisia. (Heikkilä 2021, 2–3.)

Opinnäytetyö rajattiin toimeksiantajan toimialan mukaisesti aurinkosähkön pientuotantoon ja tarkemmin sähkön jakeluverkon kanssa rinnankäyviin sähköntuotantolaitteistoihin sekä niihin kohdistuviin vaatimuksiin. Pientuotannolle määriteltyjen vaatimusten mukaisesti opinnäytetyö rajattiin koskemaan 50–1000 kW tehoaluetta, sillä vaatimus erillisestä keskitetystä suojauksesta ja käyttökielto taajuuden muutosnopeuteen reagoivasta suojauksesta ovat kyseiselle tehoalueelle asetettuja.

1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi vuonna 2015 perustettu Solarigo Systems Oy, joka lukeutuu Suomen johtaviin aurinkovoimaloiden rakentajiin. Työntekijöiden määrä on lähellä kolmeakymmentä ja liikevaihto vuonna 2020 noin viisi miljoonaa euroa (Solarigo Systems Oy 2020). Solarigon liikeidea on rakentaa aurinkovoimaloita yrityksille ja yhteisöille. Voimalat rakennetaan pääsääntöisesti suurten ja keskisuurten yritys kiinteistöjen katoille tai maa-alueille. (Solarigon palvelut n.d.)

Solarigo tarjoaa perinteistä ratkaisua EPC-sopimuksella (Engineering, Procurement, Construction), jossa asiakas ostaa voimalan kokonaan itselleen. Kyseisessä ratkaisussa investointi ja aurinkovoimalan huolto ovat asiakkaan omalla vastuulla, mutta Solarigo suunnittelee ja toteuttaa voimalan. Toinen vaihtoehto on PPA-sopimus, jolla tarkoitetaan pitkäaikaista sähkönostosopimusta. Kyseisessä ratkaisussa Solarigo hoitaa investoinnin, suunnittelun, hankinnan, rakentamisen ja huollon. Voimalan omistus on käytännössä Solarigolla ja asiakas maksaa pelkästään aurinkovoimalan tuottamasta sähköenergiasta. Asiakas maksaa tuotetusta aurinkosähköstä etukäteen sovittavan joustavan tai kiinteän hinnan. Voimaloiden rakentamisen lisäksi Solarigo tarjoaa huoltopalveluita voimaloille niin etävalvonnan kuin mahdollisten paikanpäällä tehtävien vian selvitysten ja korjausten muodossa. (Solarigon palvelut n.d.)

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimusongelma- ja kysymykset

Saaranen-Kauppinen ja Puusniekan (2006) mukaan hyvän tutkimusongelman tulisi olla yksiselitteinen ja selkeä. Tutkimusongelma sisältää kysymysten muodossa tiivistyksen siitä, mitä halutaan ai-

heen tiimoilta tietää ja tutkia. Laadullisen tutkimuksen tavoitteena on usein jonkin ilmiön kuvaaminen ja ymmärtäminen. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006, 13.) Tässä työssä tutkimusongelmana on uuden Suomessa käyttöönotettavan standardin SFS-EN 50549-1:2019 ja Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen luomat muutokset suojausten toteuttamiseen. Osa suojausasetteluista, kuten saarekekäytön estosuojauksen (LoM-suojaus) toteutus on jakeluverkonhaltijoiden itsensä päätettävissä, joten standardi ei suoraan anna vastausta suojausten toteuttamiseen. Toimeksiantajalle pyritään löytämään ratkaisu ja yhdenmukainen linja erillisen keskitetyn suojauksen toteutukseen standardin SFS-EN 50549-1:2019 ja Energiateollisuus ry:n teettämän Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen mukaisesti tapauksissa, joissa liittymispisteen taakse on kytketty laitteisto kahdella tai useammalla invertterillä tai vain yhdellä invertterillä. Lisäksi pyritään selvittämään verkkoyhtiöiden vaatimia toteutustapoja LoM-suojauksen osalta, kun käytössä on erillinen keskitetty suojalaite.

Tutkimusongelmasta kumpuavia kysymyksiä, joiden avulla on tarkoitus ratkaista ongelma ovat: Miten erillinen keskitetty suojaus tulee toteuttaa yhden invertterin tuotantolaitteistossa? Miten erillinen keskitetty suojaus tulee toteuttaa kahden tai useamman invertterin tuotantolaitteistossa? Milloin ja mihin kohtaan järjestelmää LoM-suojaus tulee toteuttaa eri verkkoyhtiöiden alueilla?

2.2 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyö on kehittämistutkimus ja tutkimusmenetelmänä käytettiin laadullista eli kvalitatiivista tutkimusta. Kehittämistutkimuksen taustalla on asiantila, ilmiö tai prosessi, johon halutaan parannus kehityksen tai muutoksen jälkeen (Kananen 2012, 13). Kehittämistutkimukselle ominaista on, että tutkija on ulkopuolinen osallistuja, eikä aktiivinen toimija, kuten toimintatutkimuksessa. Toimintatutkimuksessa tutkija testaa itse ratkaisun toimivuutta. Kehittämistutkimus tuottaa tekstin lisäksi myös käytännössä toimivia ratkaisuja. (Mts 27, 41–42.)

Laadulliselle tutkimukselle ominaista on käyttää harkinnanvaraista otantaa, jolloin tutkittavia yksilöitä ei ole kovin suurta määrää. Tutkittavia yksilöitä tutkitaan perusteellisesti, jolloin aineiston laatu korostuu. Aineiston valinta pyritään tekemään tarkoituksenmukaisesti ja teoriolla perustellen. (Eskola & Suoranta 2005, 18.) Laadullisen tutkimuksen aineistoja pyritään tulkitsemaan osana kontekstia (Juhila n.d.). Havainnointi, haastattelu ja dokumentit ovat laadullisen tutkimuksen ai-

neistonkeruumenetelmiä (Kananen 2015, 24). Etenkin dokumentteja, kuten ajantasaisia standardeja, voidaan pitää laadullisen tutkimuksen aineistonkeruussa suuressa merkityksessä, koska niistä voidaan poimia luotettavaa ennalta tutkittua tietoa tutkimuskysymyksiin. Laadulliselle tutkimukselle ominaista on avoimet tai puolistrukturoidut teemahaastattelut, joissa tietoa halutaan juuri tietyn aihepiirin tiimoilta (Hirsjärvi & Hurme 2000, 47). Haastatteluissa teemojen lisäksi on valmisteltu tarkkoja kysymyksiä, jotka esitetään haastateltaville. Liian suuria vapauksia haastattelussa ei joko haluta tai koeta tarpeelliseksi antaa. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006, 57.)

Asiantuntijoiden, kuten jakeluverkkoyhtiöiden suojausasetteluista vastaavien henkilöiden haastattelut olivat tässä kyseisessä tutkimuksessa välttämättömiä sopivien menetelmien ratkaisemiseksi. Haastatteluiden voitiin todeta olevan välttämätön aineistonkeruumenetelmä, koska standardit ohjeistavat jakeluverkkoyhtiöitä päättämään itse osasta suojauksiin liittyvistä asetuksista omalla toiminta-alueellaan. Näin ollen yhteistä toimintatapaa ei voida olettaa olevan koko maan laajuisesti. Haastattelut tehtiin sähköpostihaastatteluina ja niihin valitut 24 jakeluverkonhaltijaa valittiin lähes sattumanvaraisesti, mutta pyrkimyksenä kuitenkin saada mukaan ainakin asiakasmääriltään suurimmat jakeluverkkoyhtiöt. Jakeluverkonhaltijoiden lisäksi haastateltiin yhtä Energiategollisuus ry:n asiantuntijaa. Haastatteluiden lisäksi tähän tutkimukseen kerättiin standardeista tietoa suosittelusta ja vaadituista suojausmenetelmistä sekä tarvittava tieto muun muassa haastatteluiden tueksi, jotta osattiin määrittää oikeat kysymykset tutkimuksen kannalta.

Analyysimenetelmät voidaan jakaa määrällisiin ja laadullisiin analyysiin. Güntherin, Hasasen ja Juhilan (n.d.) mukaan analyysimenetelmä on se konkreettinen tapa, jolla aineistoa käsitellään. Realistisella tarkastelutavalla kiinnostus kohdistuu aineistoon ja siihen, mitä tutkittavasta aiheesta siinä kerrotaan. (Günther, Hasanen & Juhila n.d.) Toisinaan laadullisessa analyysissä pyritään tekemään yleistyksiä sekä päätelmiä aineistosta saadun tiedon perusteella. Aineistoa tarkastellaan monipuolisesti ja yksityiskohtaisesti nostaten merkityksellisiä teemoja esiin. Laadullisessa analyysissä ei pyritä kuitenkaan yleistämään tilastollisesti, kuten määrällisessä analyysissä. (Eskola & Suoranta 2005, 65.) Aineistosta tehdyn laadullisen analyysin perusteella tehdään tulkintaa ja päätelmiä suhteessa tutkimusongelmaan. Tulkinnat tehdään yleensä yksityiskohtaisista huomioista yleisiin. Laadullisen tutkimuksen sisällönanalyysin perinteisiä välineitä ovat koodaaminen, teemoittelu ja tyyppittely. (Günther ym. n.d.) Laadullista sisällönanalyysia tehdessä keskitytään siihen, mistä aiheista,

asioista ja teemoista aineisto kertoo. Tarkasteltavia kohteita ovat muun muassa: mistä haastattelut puhuvat tai mitä asioita tekstissä käsitellään. (Vuori n.d.)

Tässä tutkimuksessa aineiston analysointiin käytettiin laadullista sekä pieneltä osin myös määrällistä analyysia. Laadullisen analyysin menetelmistä teemoittelu ja tyypittely nousivat sopivimmiksi menetelmiksi. Käytännön ongelmia ratkaistaessa teemoittelu on aineistolle suositeltava analysointitapa (Eskola & Suoranta 2005, 178). Teemoittelulla aineistosta nostetaan esiin tutkimusongelmaa valaisevia teemoja, joiden avulla on mahdollista vertailla siinä esiintyneitä ja siitä ilmenneitä tiettyjä teemoja (mts. 174). Tyypittelyä edeltää yleensä teemoittelu. Tyypittelyssä aineisto ryhmitellään tyypeiksi eli selviksi ryhmiksi samankaltaisia tarinoita. Tyypittelyn avulla tiivistetään ja niihin tungetaan sellaisia asioita, joita yksittäisessä vastauksessa ei ole. Tarinoista voidaan rakentaa tyypillisiä tilanteita, jotka kuvaavat osaa aineistosta. (Mts. 181.) Asiantuntijoiden haastatteluista muodostettiin yleisesti teemat kysymysten aihepiirien mukaan, joiden avulla myös vastaukset sijoitettiin omiin ryhmiinsä. Pienemmistä ryhmistä voitiin yksityiskohtaisemmin havainnoida ja tyypitellä vastauksia toimintatapojen mukaan toisten samankaltaisten kanssa samaan ryhmään. Lopuksi määrällisen analysoinnin keinoin selvitettiin, kuinka monta prosenttia haastatelluista on ollut mistäkin asiasta mitään mieltä.

2.3 Tutkimuksen luotettavuus

Eskolan ja Suorannan (2005, 210) mukaan lähtökohtana laadullisen tutkimuksen luotettavuudelle on tutkijan oma avoin subjektiivisuus ja hyväksyminen, että tutkimuksen keskeinen tutkimusväline on itse tutkija. Laadullisen tutkimuksen luotettavuuden tärkein tekijä on siis tutkija itse ja kuinka kriittisesti hän arvioi omaa toimintaansa läpi työn. Eskola ja Suoranta (2005) toteavat kvalitatiivisten tutkimusten raporttien olevan kvantitatiivisiin nähden henkilökohtaisempia ja tutkijan omaa pohdintaa ilmaisevia. Kvantitatiivisten tutkimusten luotettavuutta arvioidessa onkin puhuttu vain mittauksen luotettavuudesta, eikä näin ollen arvioitu tutkijan muita toimenpiteitä. (Eskola & Suoranta 2005, 210–211.)

Tutkimuksen luotettavuutta arvioidessa nousee esiin termejä, kuten uskottavuus, siirrettävyys, varmuus ja vahvistuvuus. Kyseisiä termejä voidaan kutsua luotettavuuskriteereiksi, jotka eivät sanoina ole tärkeitä, vaan ensin täytyy käsittää niiden sisältö. Uskottavuudesta puhuttaessa tutkijan täytyy tarkastella, että vastaavatko hänen tulkintansa ja käsitteellistyksensä tutkittavien käsityksiä.

Laadullisessa tutkimuksessa tutkimustulosten siirrettävyys katsotaan hankalaksi, mutta mahdolliseksi tietyin ehdoin. Tutkimuksen siirrettävyydestä puhuttaessa yleisesti nähdään, että tutkimuksen yleistykset eivät olisi sosiaalisen todellisuuden eli kielellisen vuorovaikutuksen moninaisuudesta johtuen mahdollisia. Varmuutta tutkimukseen saadaan tutkijan ennako-oletukset huomioon ottaen. Vahvistuvuus puolestaan kasvaa, kun tehdyt tulkinnat saavat vastaavia tapauksia tarkastelleista tutkimuksista tukea. (Mts. 211–212.)

Kun tarkastellaan tutkimustekstiä realistisen luotettavuusnäkökuvan mukaisesti, käytetään validiteetin perinteisiä käsitteitä, jotka voidaan jakaa ulkoiseen ja sisäiseen validiteettiin. Sisäisestä validiteetista eli pätevydestä puhuttaessa viitataan tutkimusten käsitteellisten ja teoreettisten määrittelyjen yhdenmukaisuuteen. Ulkoisen validiteetin tapauksessa tarkoitetaan tehtyjen tulkintojen, johtopäätösten ja aineiston välisen suhteen pätevyyttä. Tutkijan tieteellistä otetta ja tieteenalansa hallintaa osoitetaan sisäisellä validiteetilla, kun taas tutkimushavainto on ulkoisesti validi silloin, kun tutkimuskohde on kuvattu juuri sellaisena kuin se on. Validiteettien lisäksi realistisen luotettavuusnäkökuvan osaksi kuuluu reliabiliteetti. Reliaabeleiksi sanotaan aineiston tulkintaa, kun siinä ei ole ristiriitaisuuksia. Tutkimuksen reliabiliteettia voidaan tarkastella indikaattorien vaihdolla, käyttämällä useampaa havaintokertaa tai useampaa havainnoitsijaa. (Mts. 213.)

Luotettavuuteen on tässä tutkimuksessa kiinnitetty huomiota tutkijan kattavalla ja kriittisellä perehtyneisyydellä aiheeseen. Tutkijan hallitessa aiheesta termit ja perustiedot, on tutkimuksen haastattelut pystytty luomaan sisällöllisesti niin, että asiantuntijoiden ja tutkijan välille syntyy korrektia alakohtaista vuoropuhelua ja sitä kautta varmistetaan, että molemmat osapuolet puhuvat samaa kieltä. Tutkimuksen luotettavuutta parannettiin haastattelemalla useita alan asiantuntijoita, jolloin vastauksia vertailtaessa voitiin toisen asiantuntijan väittämää tukea toisen asiantuntijan samantapaisella väitteellä. Haastatteluista saatuja vastauksia tarkasteltiin kriittisesti aihepiirin teoriaan, kuten standardeihin verraten.

3 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmän peruseräilyperiaatteena on auringon säteilyenergian muuttaminen aurinkopaneelien avulla valosähköisessä ilmiössä sähköenergiaksi. Aurinkovoimalat koostuvat yleensä useasta sarjaan kytketystä paneelistä, jolloin niitä kutsutaan paneelitoiksi. Aurinkosähköä voidaan tuottaa niin sanotulla off-grid saarekekäytöllä vain omaan käyttöön tai jakeluverkon rinnalla (on-

grid) ensisijaisesti omaan käyttöön, jolloin ylijäämä siirretään verkkoon. (Aurinkosähköjärjestelmät n.d.) Tämän opinnäytetyön rajausten mukaisesti käsitellään tuotantolaitteistoja, jotka ovat kytetty rinnan jakeluverkon kanssa.

3.1 Aurinkosähkön pientuotanto

Sähkön pientuotannosta puhuttaessa määritelmät perustuvat pääosin voimalaitoksen nimellis- tai maksimitehoon. Pientuotantoa kutsutaan yleisesti myös nimellä hajautettu tuotanto, mikä perustuu siihen, että voimalat sijaitsevat käyttökohteiden lähellä ja kyseisten voimaloiden sähköenergian tuotanto kohdistetaan yleensä suoraan jakeluverkon kautta paikallista tai alueellista tarvetta varten. Usein pientuotannon yhteydessä puhutaan myös mikrotuotannosta. Kyseisten tuotantojen määritelmät etenkin tehorojojen osalta ovat häilyviä. Nyrkkisääntönä voidaan pitää mikrotuotannolle, että sen ensisijainen tarkoitus on tuottaa sähköä kulutuskohteen omaan käyttöön ja verkkoon syötetty sähkö on satunnaista ja vähäistä. (Opas sähkön pientuottajalle 2012, 5.)

Standardin SFS-EN 50549-1:2019 mukaan mikrotuotantolaitoksen nimellisvirta saa olla yksivaiheisena enintään 16 A ja näin ollen maksimiteho kolmivaiheisena olisi noin 11 kW (SFS-EN 50549-1:2019, 12). Lähteistä riippuen mikrotuotannon yläraja kuitenkin vaihtelee. Motivan artikkelissa kerrotaan rajan olevan 50 kVA ja Tukesin artikkelissa puolestaan 100 kVA. (Aurinkosähköjärjestelmät n.d.; Sähkön pientuotanto 2020.) Sähkömarkkinalain (2013, 3 §) mukaan pienimuotoisella sähköntuotannolla tarkoitetaan ”voimalaitosta tai usean voimalaitoksen muodostamaa kokonaisuutta, jonka teho on enintään kaksi megavolttiampeeria”. Todetaan siis, että mikrotuotannolla tarkoitetaan alle 100 kVA voimalaitoksia ja pientuotannolla voimalaitoksia, jotka ovat tehoalueeltaan 100 kVA–2 MVA.

3.2 Aurinkovoimalan osat ja toimintaperiaate

Aurinkosähköjärjestelmän toiminnan kannalta pääkomponentit ovat aurinkopaneelit ja paneeleilla tuotetun tasasähkön vaihtosähköksi muuttava vaihtosuuntaaja eli invertteri. Järjestelmän turvalliseen toimintaan tarvitaan myös kuvion 1 mukaisesti vaihtovirtapiirin erotus- tai turvakytkin invertterin ja rakennuksen sähkökeskuksen väliin, jotta järjestelmä voidaan erottaa verkosta mahdollisten huolto- tai korjaustilanteiden ajaksi. Turvakytkimen sijainti pitää olla sellainen, että

verkkoyhtiöllä on kyseiseen tilaan vapaa pääsy. Tasavirtapiirin puolella täytyy myös olla oma turvakytin, mutta se voi olla tietyin ehdoin myös valmiina invertterissä itsessään. Jakeluverkon kanssa rinnan kytketyt järjestelmät tarvitsevat sähkömittarin, jolla kyetään kaksisuuntaiseen mittaukseen ja näin ollen mahdollinen ylijäämä sähkö on mahdollista myydä sähköyhtiölle. (Aurinkosähköjärjestelmät n.d.; Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2021.)

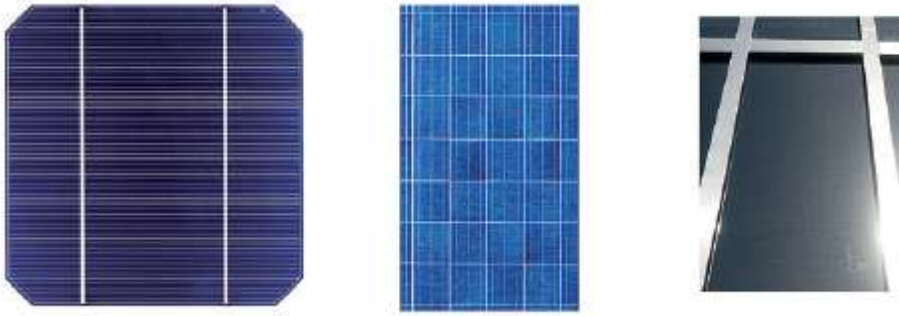


Kuvio 1. Jakeluverkon kanssa rinnan kytketyn aurinkosähköjärjestelmän kokoonpano (Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2021)

3.2.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelien toiminta perustuu aurinkokennojen kykyyn hyödyntää auringon säteilyenergiaa. Aurinkopaneelit koostuvat useista sarjaan tai joskus myös rinnan kytketyistä yksittäisistä aurinkokennoista. (Aurinkosähköjärjestelmät n.d.) Auringonsäteiden sisältämät hiukkaset eli fotonit kuljettavat säteilyenergian aurinkokennoihin, joissa fotonit luovuttavat energiansa kennomateriaalin elektroneille. Sähkövirta muodostuu elektronien avulla aurinkokennojen virtajohtimiin. (Auringosta sähköä 2021.)

Aurinkopaneeleita on saatavilla erityyppisinä. Yleisimmät aurinkopaneelit ovat valmistettu yksi- tai monikiteisistä piikennoista, joista ne ovat saaneet myös nimensä. Niiden lisäksi markkinoilla on taipuvia ohutkalvopaneeleita. (Lehto, Orrberg, Ylinen & Andersén 2021, 12–13.) Kuviossa 2 on esitetty vasemmalta oikealle yksi- ja monikiteiset paneelit sekä ohutkalvopaneeli.



Kuvio 2 Yleisimmät aurinkopaneelityypit (Lehto ym. 2021, 12)

Kennotyyppien välillä on eroja niin valmistuskustannusten kuin teknisten ominaisuuksienkin suhteen. Lehto ja muut toteavat yksikiteisten paneelien olevan hyötysuhteeltaan parhaita sekä kustannuksiltaan kalliita. Monikiteisiä paneeleita voidaan valmistaa sulattamalla yksikiteisen piin leikkuu- ja hiontajätteitä. Monikiteisten kennojen valmistuksessa syntyy kidevirheitä, jotka alentavat hyötysuhdetta ja näin ollen myös niiden hankintahinta on alhaisempi. (Lehto ym. 2021, 12–13.)

Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien kennotyyppien ominaisuuksia.

Taulukko 1 Yleisimpien kennotyyppien ominaisuuksien vertailu (Lehto ym. 2021, 12)

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

Aurinkopaneelien hyötysuhdetta pyritään parantamaan erilaisin keinoin. Paneelit varustetaan niin sanotuilla virtakiskoilla, jotka näyttävät paneelissa suorina viivoina (Photovoltaic plants 2019, 17). Virtakiskojen tehtävänä on kytkeä kennosarjat toisiinsa. Virtakiskojen määrää suurentamalla mahdollistetaan liitäntäliuskojen koon pienentäminen sekä vähennetään sarjaresistanssia, joka nä-

kyky suoraan hyötysuhteen kasvuna. Aurinkokennot voidaan jakaa kahteen osaan, minkä avulla resistiivisiä tehohäviöitä saadaan pienennettyä ja hyötysuhdetta parannettua. Puolikatkastut aurinkokennot tuottavat puolet kokonaisen kennon virrasta, mikä johtaa resistiivisten häviöiden pienemiseen liitännöissä. Auringon säteilyenergiaa pyritään maksimaalisesti hyödyntämään kaksipuoleisten aurinkopaneelien avulla. Perinteisten yksipuoleisten paneelien sijasta kaksipuoleisilla paneeleilla voidaan hyödyntää myös aurinkopaneelien takaa rakenteista heijastuvat säteilyt. Tuotantotehoon vaikuttaa ympärillä olevan materiaalin pinnan ominaisuudet, kuten väri ja tiheys. Valkoisella pinnalla voidaan tuotantoa kasvattaa jopa 20 %. (Photovoltaic plants 2019, 17–19.)

Aurinkopaneelit kytketään yleisesti sarjaan, jolloin jokaisen paneelin läpi kulkee sama virta. Kytkemällä paneeleita sarjaan paneeliketjuiksi saadaan suurempi jännite. Paneelit on kannattavaa kytkeä sarjaan etenkin silloin, kun siirtomatka paneeleilta invertterille on pitkä, koska jännitteen kaksinkertaistaminen laskee siirtohäviöitä neljäsosaan. Paneeleista muodostettu jännite sarjaankytkennällä on paneelijännitteiden summa. (Aurinkosähköjärjestelmän asennusohje n.d.) Jännitettä ei voida kuitenkaan nostaa loputtomiin kytkemällä paneeleita sarjaan, vaan järjestelmässä vastaan tulee invertterin suurin sallittu sisääntulojännite, joka on yleensä 1000 V_{DC} ja suuremmilla useamman sadan kilowatin inverttereillä 1500 V_{DC}. Paneeliketjuun liitettävien aurinkopaneelien suurin määrä voidaan laskea käyttämällä kyseisen paneelin suurinta avoimen piirin jännitettä V_{OC} kertomalla paneelien lukumäärällä. Tällöin tulee huomioida myös lämpötilan vaikutus avoimen piirin jännitteeseen, koska kylmällä ilmalla paneeleista saatava jännite on suurempi kuin lämpimällä kelillä. Paneelijännitteiden summa ei saa siis ylittää invertterin suurinta sisääntulojännitettä. Vastaavasti paneelijännite ei saa myöskään olla liian matala, sillä invertterien maksimitehopisteen seuraajat (MPPT-säätimet) tarvitsevat toimiakseen riittävän suuren jännitteen. (Photovoltaic plants 2019, 42–45.)

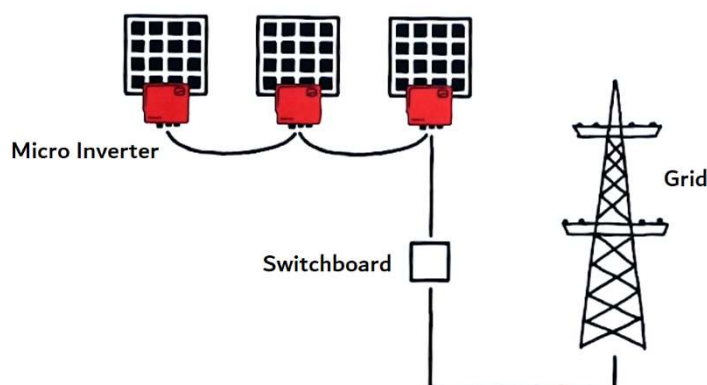
3.2.2 Invertteri

Invertterit ja tässä työssä nimenomaan verkkoinvertterit ilman muuntajaa ovat tehoelektronikan puolijohdelaitteita, joiden avulla aurinkopaneelien tuottama tasasähkö muunnetaan verkkoon sopivaksi vaihtosähköksi (Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants 2015, 35). Invertterit jaetaan järjestelmän koon ja verkkoon kytkennän perusteella yksi- ja kolmivaiheisiin inverttereihin. Yksivaiheisia inverttereitä käytetään pääsääntöisesti vain pienissä alle 3 kWp aurinkosähköjärjestelmissä,

kun taas kolmivaiheisia puolestaan lähes poikkeuksetta kaikissa tätä suuremmissa tuotantolaitoksissa. Kolmivaiheiset invertterit kytketään nimensä mukaisesti sähköverkon jokaiselle kolmelle vaiheelle, minkä johdosta ne syöttävät tuotettua sähköä verkkoon tasaisesti. Tuotettua sähköä voidaan käyttää kohteen kaikissa sähkölaitteissa, kun taas yksivaiheisen invertterin tuottama sähkö syötetään tiettyyn vaiheeseen ja näin ollen vain kyseisen vaiheen perässä olevat laitteet voivat hyödyntää tuotantoa. (Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2021.) Verkkoinvertterit voidaan jakaa kolmeen ryhmään, jotka ovat mikroinvertterit, ketjuinvertterit (string-invertterit) ja keskusinvertterit (Stapleton & Neill 2012, 64–69).

Mikroinvertteri

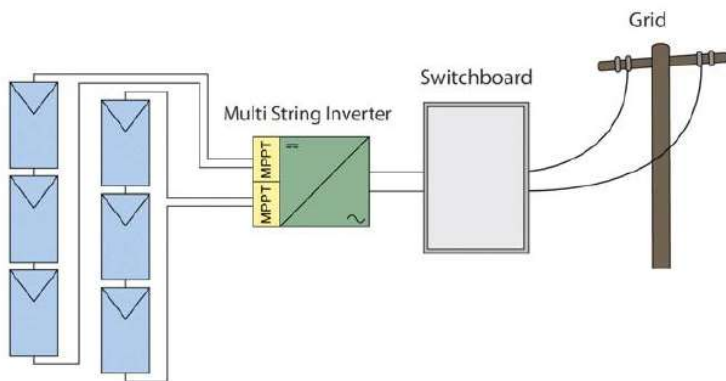
Mikroinvertterit tai toiselta nimeltä modulaariset invertterit ovat nimensä mukaisesti moduloitavia, joten niitä on tarpeen mukaan mahdollista lisätä tai vähentää yksitellen. Mikroinvertterit kiinnitetään joko aurinkopaneelin taakse tai asennuskiskoon jokaisen paneelin läheisyyteen. Kyseisellä menetelmällä säästytään pitkiltä DC-kaapeloinneilta, koska jokaisessa mikroinvertterissä on pikaliittimet AC-kaapeloinnille. Näin ollen kuvion 3 mukaisesti jokainen paneelin ja invertterin yhdistelmä kytketään rinnan ja sopivassa kohdassa tuodaan liitettäväksi verkkoon. (Stapleton & Neill 2012, 68.) Mikroinvertterien käytön etuna on maksimoitu tuotanto tilanteessa, jossa jonkin paneeli tai sen osa on varjossa. Tällaisessa tilanteessa koko järjestelmän tuotanto ei siis heikenny, vaan yksittäisen mikroinvertterin läpi tuotettu energia. Mikroinvertterien mahdolliset käyttöpaikat ovat pääosin pienet aurinkosähköjärjestelmät. (Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2021.)



Kuvio 3. Mikroinvertterin kytkennän periaate (What is a Micro Inverter? 2014, muokattu)

Ketjuinvertteri

Ketjuinvertterit eli string invertterit jaetaan MPPT -ominaisuuden mukaisesti yksi- ja moniketjuinverttereihin. Yksiketjuinvertterit sisältävät yhden maksimitehopisteen seurannan, minkä takia niitä käytetään pienissä järjestelmissä. Kyseisiin inverttereihin on mahdollista rinnankytkä mitoitus huomioon ottaen yksi tai useampi paneeliketju. (Stapleton & Neill 2012, 64–66.) Moderneissa ja suurempitehoisissa moniketjuinvertteissä maksimitehopisteen seurantoja voi olla kymmeniä ja jokaisessa useampi sisääntulo paneeliketjuille (SG250HX 2020). Stapletonin ja Neillin (2012) mukaan moniketjuinverttereiden etuna on useiden MPPT-seurainten johdosta sekä parempi energiantuotto tilanteessa, kun paneelistot ovat asennettu osoittamaan eri ilmansuuntiin, että tuotannon pysyminen maksimaalisena, vaikka jokin paneeliketjuista varjostuisi. (Stapleton & Neill 2012, 65–66.) Kuviossa 4 kuvataan ketjuinvertterin kytkentää tapauksessa, jossa kaksi erillistä paneeliketjua ovat yhdistetty invertterin eri MPPT-säätimille.

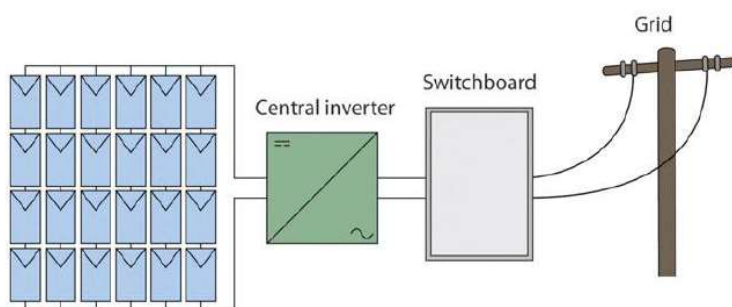


Kuvio 4. Ketjuinvertterin kytkennän periaate (Stapleton & Neill 2012)

Keskusinvertteri

Keskusinverttereitä käytetään suurissa aurinkosähköjärjestelmissä yksinkertaisen asennuksen ja hyvän luotettavuuden takia. Etenkin usean megawatti-luokan keskusinverttereissä käytetään suurimpana sisääntulojännitteenä $1000\text{ V}_{\text{DC}}$ sijasta $1500\text{ V}_{\text{DC}}$, jonka vuoksi paneeliketjuja voidaan tehdä pidemmiksi. Kuvion 5 mukaisesti paneeliketjut rinnankytketään ja tuodaan invertterille. Joissain tapauksissa järjestelmä koostuu vain yhdestä suuritehoisesta invertteristä, mutta toisinaan voidaan puhua keskusinvertteriyksiköstä, kun järjestelmä koostuu useasta pienempitehoisesta invertteristä. Tällaisissa tapauksissa on mahdollista hyödyntää master-slave -rakennetta, jossa osa

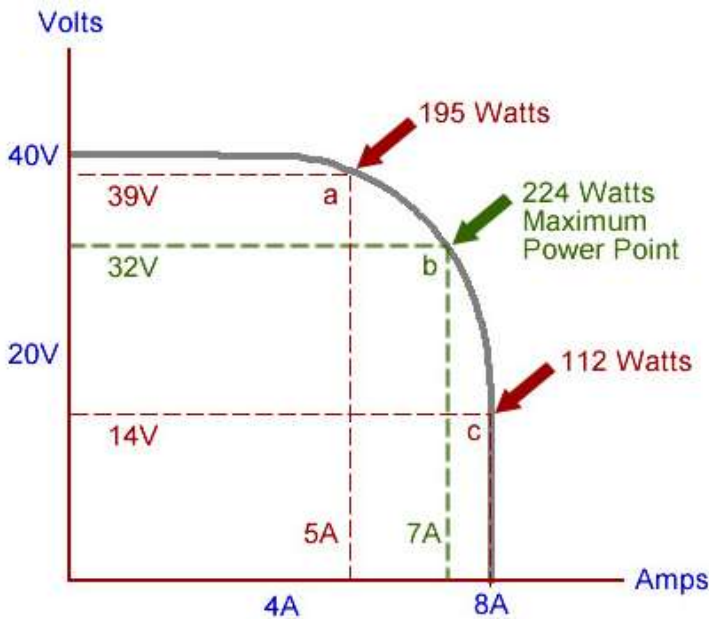
inverttereistä sammuvat auringon säteilytehon ollessa alhainen ja muut invertterit toimivat näin ollen lähellä optimaalista maksimitehopistettä. Suuren säteilytehon aikaan tehontuotanto puolestaan jakautuu kaikkien invertterien kesken. Keskusinvertterien huonona puolena on MPPT-säätimien vähäisyys paneeliketjujen lukumäärää kohden. Usein yhdellä keskusinvertterin MPPT:llä on 15–20 paneeliketjua, kun taas esimerkiksi ketjuinvertterillä määrä on kaksi tai kolme. Tästä johtuen yhdenkin paneeliketjun tekninen vika tai varjostuminen vaikuttavat suuresti tuotantoon. (Stapleton & Neill 2012, 67; Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants 2015, 35–36; Which Is Better – Solar String Inverter Vs Central Inverter 2017.)



Kuvio 5. Keskusinvertterin kytkennän periaate (Stapleton & Neill 2012)

MPPT

MPPT (Maximum Power Point Tracker) on invertterin sisäinen ohjelma, joka säätää aurinkopaneelin kuormitusta ulostulojännitteen avulla niin, että paneelia kuormitetaan suurimmalla mahdollisella teholla. MPPT:n avulla aurinkopaneelit toimivat jatkuvasti niin sanotussa maksimitehopisteessä, jolloin hyötysuhde ja tuotanto pysyy mahdollisimman korkeana. Lämpötilan tai auringon säteilyn vaihteluista riippumatta MPPT-säädin pyrkii kuormittamaan paneelia maksimiteholla. Kahden tai useamman MPPT-säätimen omaavan invertterin avulla voidaan paneelit suunnata eri suuntiin ilman, että tuotanto laskee auringon säteilyn ollessa toisesta suunnasta voimakkaampaa. Toisen MPPT-säätimen paneelit suunnataan esimerkiksi itään ja toisen länteen. (Mäkinen 2019, 11.) Kuviossa 6 selvennetään aurinkopaneelin maksimitehopisteen muodostuminen riippuen kuormituksesta.



Kuvio 6 Aurinkopaneelin maksimitehopiste kuvaajassa (Solar Panel MPPT Explained n.d.)

3.2.3 Kaapelointi

Aurinkovoimalan kaapelointi toteutetaan paneelistolta invertterille DC-tasajännitekaapeleilla. Aurinkovoimalan tasajännitekaapelit ovat lähtökohtaisesti valmistettu kestämään hyvin ulkotiloja ja sen seurauksena ulkoista rasitusta kuten auringonvaloa. Kytkeäajan säästämiseksi paneeleissa on nykyisin yleisesti valmiina MC4-liittimin varustetut kaapelit, joiden avulla kytkentä viereiseen paneeliin onnistuu nopeasti. Paneelista lähtevä negatiivinen kaapeli yhdistetään seuraavan paneelin positiiviseen liittimeen paneeliketjujen muodostamiseksi. Voimalan tasajännitekaapelin poikkipinta-ala on tyypillisesti $2,5\text{mm}^2$, 4mm^2 tai 6mm^2 ja ne ovat monisäikeisiä. Kaapelin valinnassa on tärkeää varmistaa virta- ja jännitekestoisuus sekä jännitteenaleneman suuruus. (Stapleton & Neill 2012, 72–73.)

Tasajännitekaapeloinnin lisäksi aurinkovoimalat tarvitsevat AC-kaapelointia invertterin ja sähköverkon yhdistämiseksi. Maadoitettavia osia aurinkovoimalassa ovat paneelilinielit, kaapelitiet ja invertterit. (Stapleton & Neill 2012, 151–152.) Suomessa noudatetaan aurinkovoimalan AC-puolen kaapeloinnin osalta pienjänniteasennusten standardisarjaa SFS 6000 ja suurjänniteasennuksissa SFS 6001 (Sähköasennuksia koskevat standardit n.d.).

4 Aurinkosähköjärjestelmän suojaus

Kytettäessä aurinkosähköjärjestelmää yleisen sähköverkon kanssa rinnan on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa henkilöturvallisuuden lisäksi niin oman tuotantolaitteiston kuin sähköverkonkin laiteturvallisuus. Verkonhaltija määrittelee alueellaan voimalaitoksen ominaisuudet huomioon ottaen tarvittavat järjestelmät ja asetukset sähköverkon suojaamiseksi. Tämä edellyttää yhteistyötä niin liittyjän kuin verkonhaltijankin osalta. (Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset 2018, 39.)

Lähtökohtaisesti suojausasettelut tuotantolaitoksen ja tuotantolaitoksenliitännän osalta ovat liittyjän vastuulla määrittää oikein, jotta vältetään laitevaurioilta sekä taataan henkilö- ja laiteturvallisuus. Suojausasettelut antavat rajat tuotantolaitoksen toiminnalle, jotta sen on mahdollista pysyä sähköjärjestelmän häiriöiden aikana verkossa niin kauan kuin itse voimalaitoksen teknologia ja toiminnallinen turvallisuus sen sallivat. Tuotantolaitoksen suojausten suunnittelussa liittyjän vastuulla on ottaa huomioon häiriöiden ja vikojen aiheuttamat lyhytaikaiset voimakkaat muutokset, jotka tapahtuvat sähköjärjestelmässä. Kyseisiä äkillisiä voimakkaita muutoksia voi ilmetä sähköverkon virroissa, jännitteissä ja taajuudessa. (Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset 2018, 39.)

Tuotantolaitoksen sähköisen suojausten tulee olla prioriteettina ennen toiminnallisia säätöjä. Suunnittelussa täytyykin ottaa huomioon järjestelmän käyttövarmuus, terveys ja turvallisuus niin kansalaisten kuin työntekijöidenkin keskuudessa ja mahdollisten vaurioiden pienentäminen, jotka kohdistuvat tuotantolaitokseen. Suojaus- ja säätölaitteet voidaankin laittaa seuraavanlaiseen tärkeysjärjestykseen, jota liittyjän on noudatettava (Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset 2018, 39):

1. sähköverkon ja voimalaitoksen suojaus
2. synteettinen eli keinotekoinen inertia (mikäli vaadittu)
3. taajuuden ja pätötehon säätö
4. tehon rajoittaminen
5. tehon muutosnopeuden rajoittaminen.

4.1 Suojalaitteet ja suojaustoiminnot

Aurinkosähköjärjestelmän turvallinen toiminta vaatii osakseen tiettyjä suojalaitteita ja -toimintoja mukaan lukien maadoituksen ja potentiaalın tasauksen. Järjestelmän asentamisen nopeuttamiseksi ja yksinkertaistamiseksi onkin nykyajan moderneissa inverttereissä integroituna suurin osa vaadituista suojauksista. Mikäli vaaditut suojaukset kuitenkin puuttuvat itse invertteristä, niin on ne asennettava erikseen. (Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä 2021.) Invertterien tulisi sisältää ainakin seuraavat suojaustoiminnot (Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 2015, 73):

- suojaus väärää polariteettia vastaan
- ylijännite- ja ylikuormitussuoja
- saarekekäytön esto
- eristystilan valvonta.

4.1.1 Erotuslaitteet

Aurinkosähköjärjestelmältä vaaditaan erotuslaite niin tasavirran kuin vaihtovirrankin osuuksille, jotta mahdolliset korjaus-, huolto- ja pelastustyöt voidaan tehdä turvallisesti järjestelmän ollessa jännitteetön. AC-puolella erotuslaitteena voi olla joko liittymän pääkytkin tai erillinen laitteiston pääkytkin. (SFS 6000-5-55:2017, 11.) Järjestelmän DC-puolelle vaaditaan sopiva kuormanerotin tai katkaisija, joka soveltuu erottamiseen (SFS 6000-7-712:2017, 20). Usein tämän päivän moderneissa inverttereissä on DC-kytkimet sisäänrakennettuina, mutta niitä kuitenkin suositellaan asennettavaksi erillisinä DC-erotuskytkiminä tai -turvakytkiminä, jolloin toimintatapa on selkeä ja yhtenäinen sekä erotustoiminto luotettava. Mikäli kuitenkin invertterin omia DC-kytkimiä käytetään kuorman erottamiseen, niin on niiden täytettävä taulukon 2 mukaiset vaatimukset. Kuten taulukosta voidaan todeta, niin esimerkiksi DC-puolella kontaktorin luoma erotus ei ole hyväksyttävä erotusvaatimusten kannalta. (Lehto ym. 2021, 132–133.)

Taulukko 2 Aurinkosähköjärjestelmältä vaadittavat erotuslaitteet tasasähköpuolella (Lehto ym. 2021, 133)

Piiri tai piirin osa	Erotuslaite	Vaatus/Suositus?
Paneeliketju (string)	Erotin (a)	Vaaditaan
Osapaneelisto (sub-array)	Erotin (a)	Vaaditaan
	Erotuskytkin kuormakytkimellä (b, c)	Suosittelaa
Paneelisto (array)	Erotuskytkin kuormakytkimellä (b, c)	Vaaditaan
(a) Esim. eristetty liitin tai erotin.		
(b) Esim. kuormanerotin tai katkaisija.		
(c) Joko yksi laite tai useamman laitteen yhdistelmä, joka toteuttaa erotuksen ja katkaisun.		

4.1.2 Tasasähköpiirin ja paneeliston suojaukset

Tasasähköpuolelle tarvittavat suojalaitteet ovat usein integroituna vaihtosuuntaajaan. Joissain tapauksissa kuitenkin vaaditaan erilliset tasasähkölle sopivat ylivirta- ja ylijännitesuojat erotuskytkimen lisäksi. Suojalaitteiden täytyy olla tasasähkökäyttöön hyväksytyjä ja jännitekestoisuudeltaan vähintään paneeliston suurimman avoimen piirin jännitteen U_{oc} kestäviä. Paneeliston suurin avoimen piirin jännite on yleensä pienillä ja keskisuurilla laitteistoilla 1000–1500 V_{DC}. Suojalaitteiden lämmönkestoisuuden on oltava sama kuin aurinkopaneelilla, mikäli niitä asennetaan paneeliston luokse. (Lehto ym. 2021, 126.)

Ylivirtasuojaus

Paneeliryhmien tai kaapelointien osalta ei tarvita tasasähkösuuksilla ylikuormitussuojausta, mikäli MPPT-säätimeen on kytketty paneeliketjuja kaksi tai vähemmän ja virran kulku säätimien välillä on estetty. Ylikuormitussuojausta ei myöskään vaadita, jos paneeliketjujen jatkuva kuormitettavuus kaapeloinnin osalta on vähintään 1,25 kertaa I_{sc} (STC) eli paneeliketjun mitoitusvirta. Käytännössä pienissä ja keskisuurissa aurinkosähköjärjestelmissä ei ylivirtasuojia tarvita, kun paneelit on ryhmitelty kannattavasti säätimiin ja kaapelit ovat riittävän suuria jännitteenalenumasta johtuvan mitoituksen takia. (Lehto ym. 2021, 126.)

Suurissa järjestelmissä MPPT-säätimien perässä voi kuitenkin olla enemmän kuin kaksi paneeliketjua, jolloin ylivirtasuojat vaaditaan. Ylivirtasuojauksia tulee tällöin käyttää jokaisessa paneeliketjussa, ja suojalaitteiden valinnassa sekä mitoituksessa käytetään standardin SFS 6000-7-712 mukaisia periaatteita. (Lehto ym. 2021, 126.) Tasasähköosassa on käytettävä ylivirtasuojana standardin (SFS 6000-7-712:2017, 17):

- SFS-EN 60269-6 mukaisia gPV-varokkeita
- SFS-EN 60947-3 mukaista varokeytinkyhdistelmää
- SFS-EN 60947-2 tai SFS-EN 60898-2 mukaista katkaisijaa.

Ylijännitesuojaus

Suomessa ukkospäivien määrä on useimpiin Euroopan maihin verrattuna vähäinen, minkä takia Suomessa on muuta Eurooppaa kevyempi velvoite ylijännitesuojauksen käytöstä. Suomen maantieteellisestä sijainnista johtuen sähköasennusten ylijännitesuojausta ei vaadita, mikäli kohde on maakaapeloidussa kaupunkiympäristössä. Taajama- ja maaseutu ympäristön kohteissa puolestaan vaaditaan ylijännitesuojaus, mikäli ylijännitteet ja niistä aiheutuvat seuraukset voivat vahingoittaa (SFS 6000-4-44:2017, 12–13.):

- ihmishenkiä esimerkiksi turvajärjestelmien tai terveydenhuoltolaitosten toimintaa häiritsevillä
- julkisia palveluja ja kulttuuriperintöä
- kaupallisia tai teollisuuden toimintoja
- suuria ihmismääriä.

Kyseisten kohteiden ylijännitesuojauksesta voidaan kuitenkin luopua, mikäli standardin SFS 6000-4-44 kohdan 443.5 riskiarvioinnilla toisin todetaan. Standardin SFS 6000-4-44 riskiarviointi käsittelee suojausta ilmastollisilta transienttiylijännitteiltä. Muissa rakennuksissa kuten normaaleissa asuinkiinteistöissä, vapaa-ajanasunnoissa ja niihin liittyvissä tiloissa tulee ylijännitesuojaus toteutua silloin, kun ne ovat liittyneenä ilmajohtoverkkoon. Tässäkin tapauksessa voidaan riskiarvioinnilla arvioida tarve ylijännitesuojauksen käytöstä. (SFS 6000-4-44:2017, 13.)

Mikäli standardin SFS 6000-4-44 kohdan 443.5 riskienarvioinnin mukaisesti suojausta ei vaadita transienttiylijännitteiltä, jotka ovat ilmastollista alkuperää, niin silloin on tehtävä standardin SFS 6000-7-712 mukainen riskienarviointi. Kyseiset menetelmät ovat toistensa kanssa samankaltaisia,

mutta jälkimmäisessä tarkastellaan aurinkosähköjärjestelmän suojaamattomia johtojärjestelmiä liittymän ominaisuuksien sijasta. (Lehto ym. 2021, 139; SFS 6000-4-44:2017, 11; SFS 6000-7-712:2017, 18.)

Useimmat vaihtosuuntaajat sisältävät nykyisin ylijännitesuojat niin tasasähkön kuin vaihtosähkönkin puolella. Vaihtosuuntaajan ylijännitesuojien katsotaan täyttävän ylijännitesuojaustoiminnon silloin, kun niiden on määritelty soveltuvan aurinkosähköjärjestelmän tasasähköosaan valmistajan toimesta. Mikäli valmistaja ei ole määritellyt kyseisten ylijännitesuojien sopivuutta tasasähköosaan, niin täytyy silloin suojaus toteuttaa ulkoisilla ylijännitesuojilla. (SFS 6000-7-712:2017, 18.)

4.1.3 Invertteriin integroidut suojaukset

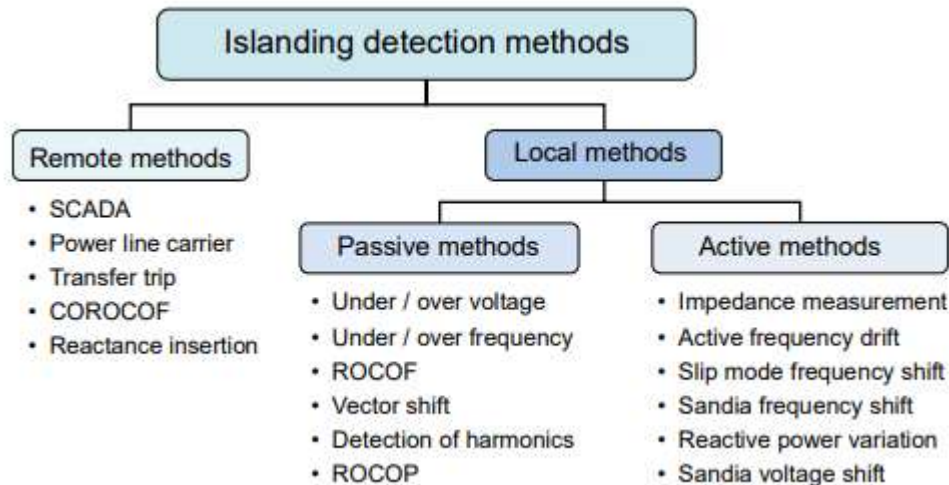
Aurinkosähköjärjestelmään liitettävät invertterit sisältävät ylijännite- ja ylivirtasuojauksen lisäksi monia suojaustoimintoja, joiden avulla itse järjestelmää kuin sähköverkkoakin pyritään suojaamaan. (Stapleton & Neill 2012, 69). Vaihtosuuntaajan omien komponenttien ja tulipaloriskin takia invertterit sisältävät suojauksen väärää polariteettia vastaan. Käytännössä kyseinen suojaus estää, ettei paneelistolta tulevia kaapeleita kytkeä invertteriin väärin päin. (Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 2015, 107.)

Aurinkosähköjärjestelmien yleisin vikatyyppe on eristysvika DC-puolella (The hidden hazards of ground faults in PV systems n.d.). Eristysvika voi johtua esimerkiksi vahingoittuneista paneeleista tai kaapeleista, huonoista tai ikääntyneistä liitoksista tai liitoksiin päässeestä vedestä, joka alentaa eristysresistanssia. Invertterit sisältävät eristystilan valvontaan toiminnon, jonka avulla eristysresistanssia mitataan positiivisen ja negatiivisen sisääntulon sekä maan välillä ennen verkkoon kytkeytymistä. Resistanssin ollessa alle ennalta asetellun arvon, invertteri ei kytkeydy verkkoon ja ilmoittaa alhaisesta eristysresistanssista. (PV Isolation low troubleshoot guide n.d.) Näiden suojausten lisäksi invertterit sisältävät yleensä LOM-suojauksen, jota käsitellään omana kappaleena myöhemmin.

4.1.4 Saarekekäytön esto ja Loss of Mains -suojaus

Jakeluverkkoon liitetyiltä tuotantolaitoksilta vaaditaan kykyä kytkeytyä irti verkosta, kun verkon syöttö keskeytyy tai verkko ei toimi sallittujen raja-arvojen sisällä jännitteen ja taajuuden osalta.

Molemmissa tapauksissa invertteri lopettaa tuotannon, kun verkko ei ole toiminnassa. (Stapleton & Neill 2012, 70.) Kyseistä tapausta, jossa tuotantolaitos jää syöttämään saarekettä verkon jännitteen kadotessa nimitetään Loss of Mains (LoM) -tilanteeksi tai saarekekäytöksi, joka ei ole ennalta oletettu. Yleisesti on käytetty niin sanottuja passiivisia metodeja, kuten jännitteen ja taajuuden mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Joissain tapauksissa kuitenkin saarekkeen kuormat ovat erittäin lähellä yhden invertterin tai useampien inverttereiden sisältämän tuotantolaitteiston yhteenlaskettua tuotantoa, jolloin passiivinen LoM-suojaus ei välttämättä kykene pelkillä jännite- ja taajuusreileillä havaitsemaan LoM-tilannetta ja näin ollen jää syöttämään saarekettä epätoivotulla tavalla. Toisaalta saarekekäytön tunnistavien laitteiden on toisinaan havaittu tekevän herkästi virhelaukaisuja, minkä takia esimerkiksi aiemmin suositellun ROCOF-releiden käyttö on rajattu korkeintaan 50 kW tehoisille tuotantolaitteistoille. Saarekekäyttösuojauksen onkin perustuttava tekniikkaan, joka on tunnettu ja soveltuu jakeluverkon suojaukseen. (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 9–10; Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2009, 9.) Passiivisen LoM-suojauksen lisäksi käytetään aktiivimetodeita tai tietoliikennepohjaisia etämetodeja (Raipala 2018, 29). Kuviossa 7 on esitetty eri LoM-suojauksen metodeja.



Kuvio 7 Saarekekäytön havaitsemisen metodit (Raipala 2018, 29)

Osa aktiivimetodeista ei pysty luotettavasti toimimaan toiminta-aikansa puolesta LoM-suojauksena sekä niiden on havaittu aiheuttavan laitteistojen turhia verkosta irtoamisia silloin, kun suuri määrä reaktiivisia kuormia kytkeytyy verkkoon (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 10). Tietoliikenteeseen perustuvia metodeja ei puolestaan tulisi

käyttää ainoana suojauksena, vaan jonkun tunnetun menetelmän varasuojauksena, koska kyseisessä menetelmässä voi olla riskinä viestintäjärjestelmän toimimattomuus (Raipala 2018, 42).

Standardit SFS-EN 50549-1:2019 ja VDE-AR-N 4105 2018:11 eivät aseta saarekekäytön estolle suoraan vaatimuksia, vaan suojaus tulee toteuttaa standardeissa mainittujen jännite- ja taajuusrajojen kautta. Jakeluverkon suojaus asettaa ehtoja aurinkosähköjärjestelmän suojauksen valintaan tyyppin, herkkyyden ja toiminta-ajan osalta, minkä takia suojiin valinta on tehtävä yhteistyössä verkkovalvontajien kanssa. Näin ollen standardeissa verkkovalvontajien annetaan itsensä päättää saarekekäytön eston vaatiminen. (Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon 2019, 9–10; SFS 6000-5-55:2017, 11.) Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksessa Suomen asetukseksi LoM-suojauksen osalta on suositeltu passiivimetodina vector shift tai aktiivimetodien käyttöä (Heikkilä 2021). LoM-suojaus voidaan toteuttaa integroituna vaihtosuuntaajaan, kun kyseessä on pienempi tuotantolaitteisto. Vaihtoehtoisesti LoM-suojaus kuten muutkin suojaukset voidaan toteuttaa kokonaan erillisellä suojalaitteella. (Lehto ym. 2021, 47–48.)

4.1.5 Vaihtosähköpiirin suojaukset

Vaihtosähköpuolella tarvittavat suojalaitteet ovat ylivirtasuojat, erotuskytkin ja joissain tapauksissa myös turvakytkin. Aurinkosähköjärjestelmän vaihtosähköpiirin suojalaitteiden mitoitusosalta ei ole SFS 6000 -standardisarjasta poikkeavia vaatimuksia tai lievennyksiä, joten mitoituksessa käytetään pienjänniteasennusten osalta standardisarjaa SFS 6000 ja suurjänniteasennuksissa SFS 6001. (Lehto ym. 2021, 127.)

Verkkoon kytketyissä järjestelmissä ei pääsääntöisesti tarvita vikavirtasuojaa. Syöttöverkon katsotaan olevan lähes aina riittävän vahva henkilöturvallisuuden takaamiseksi ja 0,4:n ja 5 sekunnin poiskytkentäajan toteutumiseksi, kun käytössä on ylivirtasuojina sulakkeet tai johdonsuojakatkaisijat. Mikäli esimerkiksi liian pitkien johtopituuksien takia oikosulkuvirta ei riitäkään ylivirtasuojien riittävän nopeaan toimintaan, niin silloin tulisi käyttää vikavirtasuojaa vaadittujen 0,4:n ja 5 sekunnin toteutumiseksi. (Lehto ym. 2021, 127.)

4.1.6 Maadoitus ja potentiaalintasaus

Aurinkosähköjärjestelmän maadoitus noudattaa standardin SFS 6000-5-54 mukaisia periaatteita. Aurinkosähköjärjestelmän suojamaadoituksessa invertteri ja muut sähkölaitteet tulee suojata käyttäen suojamaadoitusjohdinta. Suojamaadoitusta käytetään ehkäisemään invertterin rungon tai muiden sähkölaitteiden jännitteelle alttiiden osien jännitteiseksi tulemista ja näin ollen vähennetään sähköiskun vaaraa. (Lehto ym. 2021, 135–136.)

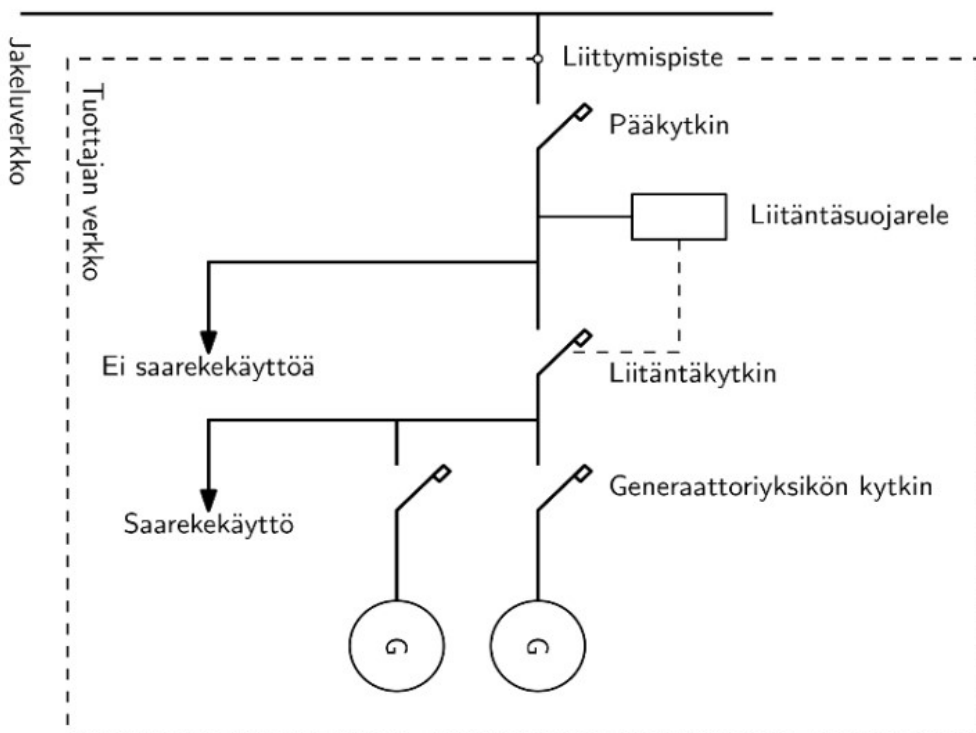
Aurinkosähköjärjestelmän potentiaalintasauksella on tarkoitus liittää kyseisen järjestelmän kaikki johtavat osat toisiinsa ja luoda yhteys maadoitukseen. Johtavia osia ovat aurinkopaneelien kiinnitystelineet, johtotiet ja aurinkopaneelien metalliset osat. Kaikkien järjestelmän osien ollessa samassa potentiaalissa, voidaan varmistua muun muassa invertterin eristystilan valvonnan luotettavasta toiminnasta. Potentiaalintasausjohtimien tulee kulkea johtoreiteillä tasasähkö- ja vaihtosähköjohtimien läheisyydessä, jotta haitallisia induktiovirtoja ja ylijännitteitä voidaan ehkäistä. (Lehto ym. 2021, 136–137.)

4.2 Keskitetty suojaus

Aurinkosähkön hajautetun tuotannon lisääntyessä tulee tuotantolaitosten suojauksen rakentamiseen kiinnittää huomiota. Suojauksen luotettavuuden ja toimivuuden kehittämisen lisäksi on järkevää ottaa huomioon tuotannon kasvaessa myös määräaikaistestien hallinta. Sandellin (2021) mukaan suojausrakenteen ja suojalaitteiden valinta täytyy tarkastella tapauskohtaisesti, koska niin keskitetyssä kuin hajautetussakin suojausrakenteessa on hyviä sekä huonoja puolia, eivätkä näin ollen ole yksiselitteisesti toistaan parempia. Keskitetyn suojauksen etuna on joustavuus tilanteissa, joissa suojausasetuksia ja -toimintoja täytyy muokata. (Sandell 2021, 47–48.) Määräaikaistestien suorittaminen on myös selkeämpi ja nopeampi toteuttaa yhdessä paikassa yhdellä laitteella (Heikkilä 2021).

Yksinkertaisesti keskitetty suojaus koostuu laitteiston suojausta ohjaavasta keskusyksiköstä ja kytkinlaitteesta, joka on keskitetty koko laitteistolle (Sandell 2021). Standardin SFS-EN 50549-1:2019 mukaan erillisen keskitetyn suojauksen toteutuksessa tulisi olla yksi suojarele ja kytkinlaite, joiden tulee vikatilanteessa kytkeä koko tuotantolaitteisto irti verkosta. Suomessa erillistä keskitettyä

suojausta suositellaan tuotantoteholtaan 50–1000 kW laitteistoille vuodesta 2023 lähtien. (Heikkilä 2021.) Yhdeksi laitteistoksi katsotaan kaikki liittymispisteen taakse kytkeytyvä tuotanto, joten yhden sekä usean invertterin sisältämässä järjestelmässä täytyy olla yhteinen keskitetty suojaus (Kainulainen 2021). Keskitetyn suojauksen mittauksen ja suojauslaitteen paikka on jakeluverkon ja tuotantolaitteiston rajapisteessä. Sisäverkon ylijännitteiden aiheuttamilta vääriä laukaisuilta vältetään suojauksen ollessa lähellä jakeluverkon liittämispistettä. (Heikkilä 2021.) Verkonhaltija voi vaatia, että keskitetty suojaus toimii toisella kytkimellä tietyllä viiveellä, mikäli keskitetyn suojauksen ensisijainen kytkin ei toimi (SFS-EN 50549-1:2019, 44). Aurinkosähkijärjestelmän keskitetyn suojauksen ei kuitenkaan tarvitse kytkeä pois laitteiston yhteydessä olevaa kulutusta (Heikkilä 2021). Kuviossa 8 on esitetty esimerkki tuotantolaitoksen liittännästä ja liittätäsuojauksesta jakeluverkkoon käyttäen keskitettyä suojausta.



Kuvio 8 Esimerkki jakeluverkkoon liitetyn tuotantolaitoksen kytkennästä keskitetyllä suojauksella (Ohjeet sähköä tuottavan laitoksen liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon 2021, 4)

Standardin SFS-EN 50549-1:2019 mukaan pienten mikrotuotantolaitosten kohdalla invertteriin voidaan integroida keskitetyn suojauksen toiminnot ja mittaukset. Yli 16 A nimellisvirran tuotantolaitosten kohdalla verkonhaltija voi puolestaan päättää raja-arvon, jonka ylittyessä tarvitaan erilliset suojalaitteet. (SFS-EN 50549-1:2019, 44.) Suomessa suositeltu raja-arvo on Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen mukaisesti 50 kW, mutta esimerkiksi muualla Euroopassa rajat ovat usein tiukemmat, kuten Italiassa 11 kW ja Saksassa 30 kVA. Suojauksen on toimittava keskitetysti vähintään jännitteen ja taajuuden osalta. (Heikkilä 2021.) Keskitetyn suojauksen suojareleen toimintojen tulee avata tuotantolaitoksen kytkin ja estää sen sulkeutuminen seuraavissa tapauksissa (SFS-EN 50549-1:2019, 18):

- vika jakeluverkossa
- saareketilanne
- taajuus- ja jännitearvojen ollessa raja-arvojen ulkopuolella.

5 Verkkoon kytkeytyminen ja irtoaminen

Jakeluverkon kanssa rinnankytkettyihin aurinkosähköjärjestelmiin on sisällytettävä suojaustoiminnot, jotka kytkvät laitteiston irti verkosta, mikäli jakeluverkon syöttö katkeaa tai sen jännitteen ja taajuuden arvot poikkeavat standardissa SFS-EN 50549-1:2019 määritellyistä arvoista (ks. liite 1). Laitetoimittajan tulee taata, että laitteen suojuuksilla on mahdollista täyttää irtoamisvaatimukset, jotka ovat asetettu standardeissa ja laissa. (Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon 2019, 7.) Liite 1 sisältää suositellut oletusasetukset tuotantolaitoksille. Kyseisistä asetuksista voidaan käyttää nimitystä Suomen asetukset (Heikkilä 2021). Jännitteiden ja taajuuksien asetteluarvot ja toiminta-ajat esitetty kootusti taulukossa 3.

Taulukko 3 Tuotantolaitoksen suojauksen toiminta-ajat ja asetteluarvot (Heikkilä 2021, muokattu)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	1 s	1,2 U_n
Alijännite	1,5 s	0,8 U_n
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz

Tuotantolaitoksen täytyy pysyä verkkoon kytkettynä vähintään 30 minuuttia verkon taajuuden ollessa alueella 47,5–49,0 Hz tai 51,0–51,5 Hz (Heikkilä 2021). Tuotantolaitoksen erottaminen verkosta tulee tapahtua elektronisilla kytkimillä tai mekaanisilla kontaktoreilla. Tuotantolaitoksen tulee lopettaa sähkön tuotanto tai irrota verkosta jollain muulla tavalla, mikäli elektroninen kytkin ei toimi suunnitellusti. Jos verkosta erottamiseen käytetään elektronista kytkinlaitetta, niin sen täytyy olla ylijänniteluokituksestaan tuotantolaitoksen valmistajan määrittelyn mukainen. (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 7.)

Tuotantolaitoksen kytkeytyminen ja käynnistyminen tehon tuottamista varten on sallittua standardin SFS-EN 50549-1:2019 mukaan, kun jännite ja taajuus ovat olleet vähintään tietyn havaintoajan sallituilla alueillaan (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 9). Kyseiset alueet löytyvät liitteen 1 kohdasta 4.10.2 ja 4.10.3 ja kootusti taulukosta 4. Yleisesti ottaen asettelu ehdot voivat riippua, että onko kyseessä laitoksen normaalikäynnistyminen vai automaattinen jälleenkytkentä suojauksen laukaisun jälkeen (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 9). Suomen asetuksissa ei kuitenkaan ole eroavaisuuksia normaalikäynnistymisen ja automaattisen jälleenkytkennän välisissä arvoissa.

Taulukko 4 Tuotantolaitoksen asetteluarvot normaalikäynnistymisessä ja automaattisen jälleenkytkennän jälkeen (Heikkilä 2021, muokattu)

Parametri	Oletusasetus
Alempi taajuus	49,0 Hz
Ylempi taajuus	51,0 Hz
Alempi jännite	0,85 U_n
Ylempi jännite	1,10 U_n
Havaintoaika	60 s
Tehon muutosnopeus	Enintään 100 %/min

Automaattisen jälleenkytketymisen tapauksessa standardi SFS-EN 50549-1:2019 määrittää pienimmäksi havaintoajaksi laukaisun jälkeen 60 sekuntia. Tuotantoyksikön tuottama nimellinen pätöteho (P_n) ei saa havaintoajaksi aikana muuttua standardin SFS-EN 50549-1:2019 oletusasetusten mukaan enempää kuin 10 % minuutissa. (SFS-EN 50549-1:2019, 48.) Niin sanottujen Suomen asetusten mukaan kuitenkin oletuksena maksimi muutosnopeus pätöteholle on 100 % minuutissa

(Heikkilä 2021). Mikäli tuotantoyksikkö ei ole aseteltavissa tai sen ollessa osittain aseteltavissa, niin se voidaan kytkeä uudelleen käyttöön 1–10 minuutin jälkeen tai jopa myöhemmin (SFS-EN 50549-1:2019, 48).

Mikäli jakeluverkon kanssa rinnankäyvää aurinkosähköjärjestelmää halutaan käyttää sähkökatkosten aikaan niin sanotusti varavoimana, kun verkko on jännitteetön, niin tällöin tuotantolaitos tulee varustaa kaksoiskytkennällä. Kaksoiskytkennän avulla tuotantolaitosta on mahdollista käyttää toisella kytkennällä normaalisti jakeluverkon kanssa rinnan sekä toisella kytkennällä kokonaan erillään omana saarekkeena sähkökatkon aikana. (Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon 2019, 9.)

6 Tutkimuksen toteutus ja tulokset

6.1 Tutkimuksen toteutus käytännössä

Tutkimus toteutettiin kvalitatiivisena tutkimuksena, jossa aineistonkeruumenetelminä käytettiin sähköpostitse käytyjä puolistrukturoituja teemahaastatteluja sekä dokumentteja, kuten standardeja. Ennen asiantuntijoiden haastatteluita tutkimuksen ongelmiin etsittiin standardista SFS-EN 50549-1:2019 vastauksia, joiden avulla pyrittiin kartoittamaan, että mitä aiheesta jo entuudestaan varmasti tiedetään ja mitä puolestaan haastatteluissa täytyy vielä selvittää. Haastatteluiden aineisto kerättiin sähköpostitse, koska tällöin kerätty tieto saatiin suoraan kirjallisessa muodossa. Tällä tavoin asiantuntijoilla oli myös mahdollisuus valmistautua laadukkaasti perustelemaan vastauksia esimerkiksi standardien kappaleisiin viitaten. Perinteisiä kasvotusten tehtäviä haastatteluita haluttiin ajankohtaisen pandemian takia välttää. Puhelu- ja videohaastattelut puolestaan koettiin hankalina ja vaivaannuttavina. Sähköpostihaastatteluihin kutsuttiin 24 eri jakeluverkonhaltijoiden asiantuntijaa. Jakeluverkkoyhtiöt olivat valittu lähes sattumanvaraisesti, pyrkimyksenä kuitenkin ottaa mukaan ainakin asiakasmääriltään suurimmat jakeluverkkoyhtiöt. Jokaiselta verkkoyhtiöltä pyrittiin löytämään asiantuntija, joka omassa verkkoyhtiössään vastaa suojauksista. Jakeluverkkoyhtiöiden lisäksi haastateltiin yhtä Energiateollisuus ry:n asiantuntijaa, koska kyseinen yhdistys on laatinut Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen. Haastatteluihin valmisteltiin ennakkoon aihealueittain muutamia avoimia kysymyksiä käyttäen hyväksi niin standardia SFS-EN 50549-1:2019 kuin Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suositusta.

Haastatteluiden alussa haastateltaville tuotiin heti selvästi esille tutkimuksen rajaus, joka oli jakeluverkon kanssa rinnankäyvät sähköntuotantolaitteistot tehoalueella 50–1000 kW. Haastatteluiden eteneminen pyrittiin ohjaamaan niin, että ensin käsiteltiin tuotantolaitteistot, jotka sisältävät vain yhden invertterin. Yhden invertterin tapauksissa haluttiin tietää, mitä rakenteelta vaaditaan ja milloin kyseistä rakennetta vaaditaan, jotta keskitetyn suojauksen elementit täyttyvät. Haastatteluissa pyrittiin selvittämään myös kahden tai useamman invertterin rakenteen omaavilta tuotantolaitteistoilta edellytykset keskitetyn suojauksen täyttymiselle. Viimeisenä pyrittiin selvittämään tuotantolaitteiston liitännäsuojaukseen liittyviä ratkaisuja LoM-suojauksen osalta. Jakeluverkkoyhtiöiden asiantuntijoilta tiedusteltiin, milloin heidän alueellaan vaaditaan LoM-suojauksia sisällytettynä erilliseen suojalaitteeseen ja milloin puolestaan voidaan käyttää vain invertterien omia LoM-suojia.

Kyseisten haastatteluiden pohjalta lähdettiin teemoittelemaan ja tyypittelemään vastauksia, jotta saataisiin selkeämpi käsitys mahdollisista yhteneväisyyksistä toisten asiantuntijoiden vastausten sekä olemassa olevan teorian välillä.

6.2 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksen haastatteluihin vastasi viidennes haastattelukutsun saaneista asiantuntijoista, joita oli 25. Haastatteluihin vastanneiden asiantuntijoiden edustamista verkkoyhtiöistä tai yhdistyksestä neljä viidestä (80 %) olivat mukana työryhmässä, joka laati niin sanotut Suomen asetukset Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suositukseen. Neljä viidestä (80 %) haastateltavien asiantuntijoiden organisaatioista – samat kuin edellä mainitussa työryhmässä – ovat ottaneet ohjeistuksissaan huomioon vuoden 2023 alussa käyttöön otettavasta suosituksesta kohdan erillisestä keskitetystä suojauksesta. Viidennes (20 %) haastateltavien asiantuntijoiden organisaatioista ei ollut selvittänyt suosituksen vaikutuksia ohjeistuksiinsa, joten kyseisiä vastauksia ei käytetä osana tutkimustuloksia, kun käsitellään erillistä keskitettyä suojausta.

Kolmen neljästä (75 %) haastatellun asiantuntijan organisaation – erillisen keskitetyn suojauksen suosituksen ohjeistuksissaan huomioon ottaneet – mukaan edellytetään keskitetyn suojauksen toteuttamiseksi keskitettyä mittausta ja keskitettyä eroonkytkentää, kun liittymispisteen taakse kytetty tuotantolaitteisto koostuu kahdesta tai useammasta invertteristä, joiden yhteenlaskettu teho on yli 50 kW. Liitännäsuojauksen tulee sisältää erillinen keskitetty suojalaite, joka kytkee yhtä

kytkintä. Neljännes (25 %) puolestaan edellyttää kyseisessä tilanteessa keskitettyä mittausta yhdellä erillisellä suojalaitteella, joka ohjaa yhtä tai useampaa kytkinlaitetta eroonkytkennän toteuttamiseksi.

Kaikkien erillisen keskitetyn suojauksen suosituksen ohjeistuksissaan huomioon ottaneiden asiantuntijoiden organisaatioiden mukaan tuotantolaitteiston keskitetyn suojauksen toteuttamiseksi edellytetään erillistä keskitettyä suojalaitetta ja kytkinlaitetta, kun liittymispisteen taakse kytketty tuotantolaitteisto koostuu vain yhdestä invertteristä, jonka teho on yli 50 kW.

Tuotantolaitteiston Loss of Mains -suojausta suositellaan jakeluverkonhaltijasta riippumatta sisällyttämään erilliseen keskitettyyn suojalaitteeseen, mikäli laitteiston LoM-suojaus toteutetaan passiivimetoodeilla. Kahden verkonhaltijan alueella erilliseen suojalaitteeseen sisällytettyä LoM-suojausta vaaditaan käytettäessä passiivimetoodeja. Käytettäessä erillistä suojalaitetta yli 50 kW tuotantolaitteistoilla, täytyy erillisen suojalaitteen sisältää vähintään taajuus- ja jännitesuojaustoiminnot. Inverttereiden omia taajuus-, jännite- ja LoM-suojauksia suositellaan pitämään käytössä, vaikka käytettäisiin erillistä suojalaitetta. Riippumatta erillisen keskitetyn suojalaitteen käytöstä, LoM-suojaus voidaan integroida inverttereihin käytettäessä aktiivimetoodeita.

7 Johtopäätökset

Tutkimusongelmana tässä opinnäytetyössä oli standardin SFS-EN 50549-1:2019 ja Energiateollisuus ry:n Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen luoma muutos suojausten toteuttamiseen erillisen keskitetyn suojauksen osalta. Ratkaisuja pyrittiin löytämään sellaisiin tapauksiin, joissa tuotantolaitteisto koostuu useasta invertteristä tai vain yhdestä invertteristä. Lisäksi selvitettiin vaatimuksia LoM-suojauksen toteutukseen, kun käytössä on liitäntäsuojaukseen erillinen keskitetty suojalaite.

Tutkimusongelmaan lähdettiin etsimään ratkaisua selvittämällä, miten erillinen keskitetty suojaus tulee toteuttaa yhden sekä kahden tai useamman invertterin tuotantolaitteistoissa. Tutkimuksen tulosten mukaan kaikki ne asiantuntijoiden organisaatiot, jotka olivat ottaneet erillisen keskitetyn suojauksen suosituksen ohjeistuksissaan huomioon, olivat sitä mieltä, että molemmissa tapauksissa invertterin tai invertterien yhteenlasketun tuotantotehon ollessa yli 50 kW, tuotantolaitteis-

ton liitantisuojaus tulee toteuttaa erillisellä keskitetyllä suojalaitteella. Kolme neljästä (75 %) olivat sitä mieltä, että erillisen keskitetyn suojalaitteen tulee kytkeä vain yhtä tuotantolaitteiston erotuskytkintä. Puolestaan neljänneksen (25 %) mukaan erillisellä keskitetyllä suojalaitteella voidaan ohjata yhtä tai useampaa kytkinlaitetta tuotantoyksiköiden erottamiseksi. Missään tapauksessa kuitenkaan yli 50 kW tuotantolaitteistoissa ei saa keskitettyä suojausta toteuttaa integroituna invertteriin, toisin kuin alle 50 kW tuotantolaitteistoissa. Näiltä osin tutkimuksen tulosta tukee standardin SFS-EN 50549-1:2019 kohta 4.9.1 ja Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suositus, joiden mukaan erillisen keskitetyn suojauksen rakenteen täytyy sisältää yksi yhteinen suojarele koko tuotantolaitteistolle ja kytkinlaite. Haastatteluiden asiantuntijat ja edellä mainitut dokumentit eivät kuitenkaan yksimielisesti totea, täytyykö erillisen keskitetyn suojalaitteen ohjata vain yhtä kytkinlaitetta, vai voiko kyseinen suojalaite ohjata useampaa kytkinlaitetta katkaistakseen tuotantoyksiköiden syöttö.

Standardin SFS-EN 50549-1:2019 antaessa jakeluverkkoyhtiöille vapaat kädet LoM-suojauksen osalta, pyrittiin tutkimusongelman ratkaisemiseksi selvittämään milloin ja mihin kohtaa järjestelmää LoM-suojaus tulee toteuttaa eri verkkoyhtiöiden alueilla. Tutkimustulosten perusteella jokaisen haastatteluun osallistuneen asiantuntijan verkkoyhtiön alueella keskitetyn suojareleen suositellaan sisältävän LoM-suojaus silloin, kun käytössä on jokin passiivimethodi. Tutkimuksen tuloksista kuten Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen Suomen asetuksistakin kävi ilmi, että passiivinen LoM-suojaus voidaan korvata aktiivimethodeilla. Tältä osin tutkimuksen tulokset ja kyseinen suositus ovat linjassa toistensa kanssa. Verkkoyhtiöiden asiantuntijat eivät haastatteluissa tarkemmin ottaneet kantaa eri passiivisten ja aktiivisten metodien käyttöön, mutta Suomen asetukset suosittelee vector shift menetelmää käytettäessä passiivista LoM-suojausta (ks. liite 1).

Tutkimustulosten perusteella ei voida siis tehdä yleistystä, että koko Suomessa vaadittaisiin käyttämään LoM-suojaukseen jotakin tiettyä suojausmenetelmää. Kyseistä tulosta tukee standardin SFS 6000-5-55:2017 kohta 551.7.4, jossa mainitaan, että moni tuotantolaitteiston suojauksen valintaan vaikuttava tekijä on riippuvainen jakeluverkon suojauksesta. Tästä johtuen valinnat suojauksen toteuttamiseen on edelleen tehtävä alueellisesti yhteistyössä sen kyseisen alueen jakeluverkkoyhtiön kanssa.

8 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää toimeksiantajalle ratkaisuja erillisen keskitetyn suojausosan osalta, kun tuotantolaitteisto koostuu joko kahdesta tai useammasta invertteristä, joiden yhteenlaskettu tuotantoteho on yli 50 kW tai kyseisen tehon ylittävästä yhdestä invertteristä. Kyseisten ratkaisujen tuli olla linjassa standardin SFS-EN 50549-1:2019 ja Energiateollisuus ry:n teettämän Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen kanssa niiltä osin, mitä Suomessa vaaditaan. Tämän lisäksi pyrittiin selvittämään verkkoyhtiöiden vaatimuksia LoM-suojaukselle, kun tuotantolaitoksen liitântäsuojaus on toteutettu erillisellä keskitetyllä suojalaitteella.

Tutkimuksen avulla saatiin selkeä käsitys siitä, kuinka erillinen keskitetty suojaus tulee Suomessa toteuttaa keskitetyn suojalaitteen osalta niin yhden kuin useammankin invertterin tapauksessa. Kuitenkaan tämän tutkimuksen perusteella ei voida täysin yksiselitteisesti sanoa, täytyykö erillisen keskitetyn suojalaitteen ohjata vain yhtä kytkinlaitetta useamman invertterin tapauksessa. LoM-suojauksen toteutuksesta saatiin selville yksiselitteisesti, mitä toimintatapaa suositellaan käytettäessä erillistä keskitettyä suojausta. Tutkimuksen tulosten avulla toimeksiantajalla on valmiudet toimia uuden standardin ja Suomen asetusten mukaisesti tutkimuksen esimerkkitalanteissa. Tutkimuksen toteuttamisella osittain myös säästettiin suunnittelijoiden aikaa, joka muuten kuluisi kyseisten asioiden selvittämiseen.

Haastatteluihin osallistuneiden vähäisestä määrästä huolimatta voidaan todeta tutkimuksen olleen onnistunut ja luotettava. Laadulliselle tutkimukselle ominainen harkinnanvarainen otanta oli avainasemassa tutkimuksen onnistumiselle, koska haastateltavien määrä jäi suhteellisen alhaiseksi. Tutkimukseen mukaan satunnaisesti valitut jakeluverkonhaltijat osoittautuivat osaltaan sattumaltakin ratkaiseviksi tekijöiksi tutkimuksen onnistumisen kannalta, koska osa verkkoyhtiöistä oli ollut työryhmässä, joka laati yhteistyössä Energiateollisuus ry:n kanssa Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset -suosituksen Suomen asetukset. Mikäli kyseisen työryhmän verkkoyhtiöt olisivat jääneet pois tutkimuksesta sattumanvaraisen otannan takia, olisivat tutkimuksen tulokset voineet olla vajaita tai mahdollisesti tutkimuksen tavoitteet olisivat jääneet jopa kokonaan saavuttamatta haastatteluihin osallistuneiden asiantuntijoiden vähäisen määrän takia.

Syitä tutkimuksen haastatteluun osallistuneiden vähäiselle määrälle voidaan löytää tietyllä tapaa tutkimuksen ajankohdasta. Haastatteluiden edetessä tuli ilmi yhdeltä verkkoyhtiöltä, että he ovat

vasta selvittämässä uuden suosituksen mukaisia vaikutuksia ohjeistuksiinsa. Tästä johtuen voidaan olettaa, että monessa muussakaan verkkoyhtiössä ei ole vielä selvitetty uuden suosituksen vaikutuksia ohjeistuksiin, jonka takia on jätetty osallistumatta tutkimuksen haastatteluun.

Alhaiseen osallistujamäärään voidaan löytää syitä myös tarkastelemalla verkkoyhtiöiden kokoa. Arviolta haastatteluihin osallistui vain asiakasmääriltään Suomen suurimmat verkkoyhtiöt, joita lähtökohtaisesti myös toivottiinkin tutkimuksen alussa. Määrällisesti kuitenkin haastattelukutsuja lähetettiin enemmän pienemmille verkkoyhtiöille. Vastauksia pienemmiltä ja keskisuurilta verkkoyhtiöiltä ei saatu lainkaan. Voidaan mahdollisesti tehdä johtopäätöksiä, että pienillä verkkoyhtiöillä ei ole joko resursseja vastata haastatteluihin tai he eivät ole selvittäneet suosituksen vaikutuksia ohjeistuksiinsa.

Suosituksena jatkotutkimukselle on suorittaa kyseinen tutkimus uudelleen vuoden 2023 puolella etenkin LoM-suojauksen osalta. Tällöin jokaisen verkkoyhtiön tulisi olla selvittänyt alueellaan uuden suosituksen vaikutuksia omaan toimintaohjeistuksiinsa. Mahdollinen jatkotutkimus on toivottavaa suorittaa kuitenkin lähivuosina, koska pientuotannon teknisten ratkaisujen kehitysvauhti on tällä hetkellä nopeaa.

Eettisyyden ja luotettavuuden arviointi

Tutkimuksen alussa tutustuttiin tarkasti JAMKin eettisiin periaatteisiin, joita noudatettiin tarkasti läpi tutkimuksen alusta loppuun. Tässä tutkimuksessa JAMKin eettisistä periaatteista voidaan korostaa etenkin lähteiden asianmukaista merkkausta, jolla tunnustetaan toisen henkilön tekemän työn arvo. Vähintäänkin yhtä tärkeässä muiden töiden arvottamisen kanssa olivat eri henkilötietojen käsittelyt, joita pyrittiin tutkimuksen aikana ottamaan huomioon äärimmäisellä tarkkuudella. Haastatteluiden asiantuntijoiden ja organisaatioiden nimet jätettiin tutkimuksessa mainitsematta, jotta henkilöitä ei voida tunnistaa välittömästi tai välillisesti. Tutkimuksen eettisyyttä pyrittiin myös tukemaan raportoitaessa tutkimustuloksia avoimesti ja vastuullisesti pimittamättä tietoja.

Tutkimustulosten luotettavuutta tarkastellaan validiteetin ja reliabiliteetin keinoin. Tulosten sisäistä validiteettia arvioidessa kiinnitetään huomiota tutkijan tieteelliseen otteeseen ja tieteenalan hallintaan (Eskola & Suoranta 2005, 213). Tutkijan on voitu todeta olevan kattavan ja

kriittisen tutkimuksen aiheeseen perehtyneisyyden jälkeen kykenevä alakohtaiseen vuoropuheluun asiantuntijoiden kanssa. Näin ollen myös luotettava tulosten tulkinta on ollut mahdollista. Ulkoista validiteettia tutkimuksen tulosten osalta tukee yhdenmukaisuus teoriaan, jolloin voidaan olettaa tulkintojen, johtopäätösten ja aineistojen olevan kuvattu juuri sellaisina kuin ne ovat. Mitä tulosten toistettavuus ja analyysin johdonmukaisuus kuvastavat tutkimuksen reliabiliteettia (Tutkimuksen toteuttaminen 2021). Tämän tutkimuksen tulosten toistettavuuden voidaan olettaa olevan helposti saavutettavissa, mikäli standardit ja suositukset eivät muutu tutkimusten ajankohdan välillä ja tutkimuksen tekijä tarkastelee kriittisesti tuloksia. Toistettavuutta helpottaa haastatteluväestön vähäinen määrä ja aiempi olemassa oleva teoria, johon tuloksia voidaan verrata. Tutkimustulosten siirrettävyys tulisi myös olla ainoastaan tutkimuksen ajankohdasta ja sen hetkistä vaatimuksista riippuvainen. Tämän opinnäytetyön puitteissa ei kuitenkaan koeta tarpeelliseksi toteuttaa tutkimusta useampaa kertaa aikataulullisista syistä, vaikka mahdollisesti haastatteluihin osallistuisikin suurempi määrä vuonna 2023.

Lähteet

- Auringosta sähköä. 2021. Artikkelit aurinkosähkön perusteista Motivan sivustolla. Viitattu 31.1.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa.
- Aurinkosähköjärjestelmän asennusohje. N.d. Artikkelit aurinkosähköjärjestelmien asennuksista Electrotorin sivustolla. Viitattu 31.1.2022. <https://www.electrotori.net/page/3/aurinkosahkojarjestelman-asennusohje>.
- Aurinkosähköjärjestelmät. N.d. Artikkelit aurinkosähköjärjestelmistä Tukesin sivustolla. Viitattu 21.10.2021. <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat>.
- Günther, K., Hasanen, K. & Juhila, K. N.d. Johdanto: Analyysi ja tulkinta. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 7.2.2022. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/analyysi-ja-tulkinta/>.
- Eskola, J. & Suoranta, J. 2005. Johdatus laadulliseen tutkimukseen. 7. p. Tampere: Vastapaino.
- Heikkilä, T. 2021. Dokumentti pientuotannon teknisten vaatimusten suosituksista. Helsinki: Energiateollisuus. Viitattu 3.10.2021. https://energia.fi/files/6404/ET_suositus_-_Pientuotannon_tekniset_vaatimukset_2021-06-03.pdf.
- Hirsjärvi, S. & Hurme, H. 2000. Tutkimushaastattelu : teemahaastattelun teoria ja käytäntö. Helsinki: Yliopistopaino.
- Juhila, K. N.d. Laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 7.2.2022. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/mita-on-laadullinen-tutkimus/laadullisen-tutkimuksen-ominaispiirteet/>.
- Kainulainen, M. 2021. Elenian ohjeistus keskitetystä suojauksesta. Sähköpostiviesti 22.12.2021.
- Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä : kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.9.2021. <https://janet.finna.fi>, Booky.
- Lehto, I., Orrberg, M., Ylinen, M. & Andersén, M. 2021. ST-käsikirja 40 aurinkosähköjärjestelmien suunnittelusta ja toteutuksesta. Toinen, uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo. Viitattu 19.11.2021. <https://janet.finna.fi>, Sähköinfo Severi.
- Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. 2009. Verkostosuositus YA9:09. Helsinki: Energiateollisuus. Viitattu 10.1.2022. https://lammaistenenergia.fi/assets/lammaistenenergia/files/mikrotuotannon_liittaminen_jakeluverkkoon.pdf.

Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. 2019. Päivitetty verkostosuositus YA9:13. Helsinki: Energiateollisuus. Viitattu 5.1.2022. https://energia.fi/files/4249/Mikrotuotannon_liittaminen_verkostosuositus_luonnos_PAIVITETTY_20191203_FINAL.pdf.

Mäkinen, J. 2019. Aurinkosähkö osana energiamurrosta PV-voimalan suunnittelijan opas suunnittelu – toteutus – ylläpito. Viitattu 26.1.2022. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A5440&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>.

Ohjeet sähköä tuottavan laitoksen liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon. 2021. Sähköntuotantolaitoksen liittäminen 4.3/21. Viitattu 31.1.2021. https://www.helensahko-verkko.fi/globalassets/hsv/palvelut/ohjeet/37139_helen_hsvn_ohjeet_yleista_laitteiston_liittaminen_40321_wca.pdf.

Opas sähkön pientuottajalle. 2012. Motivan julkaisema opas sähkön pientuottajalle. Helsinki: Motiva. Viitattu 13.10.2021. https://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf.

Photovoltaic plants. 2019. Photovoltaic plants Cutting edge technology. From sun to socket. Zurich: ABB. Viitattu 31.1.2022. <https://library.e.abb.com/public/fb75869122d24b408ab985833cd472db/9AKK107492A3277%20Photovoltaic%20plants%20-%20Technical%20Application%20Paper.pdf>.

PV Isolation low troubleshoot guide. N.d. Growattin ohje eristysvian selvitykseen. Viitattu 11.1.2022. <https://midsummerwholesale.co.uk/pdfs/pv-isolation-low-countermeasure.pdf>.

Raipala, O. 2018. Väitöskirja Loss of Mains -suojausmetodeista. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 5.1.2022. https://cris.tuni.fi/ws/portalfiles/portal/14061100/raipala_1535.pdf.

Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006. Menetelmäopetuksen tietovaranto KvaliMOTV. Kvalitatiivisten menetelmien verkko-oppikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 3.2.2022. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/tietoarkisto/julkaisut/kvalimotv.pdf>.

Sandell, T. 2021. Diplomityö, Sähkön hajautetun pientuotannon kehitys jakeluverkoissa ja vaikutukset verkon käyttöön. Espoo: Aalto-yliopisto. Viitattu 19.1.2022. https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/108289/master_Sandell_Tuukka_2021.pdf?sequence=1.

SFS 6000-4-44:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–44: Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 18.8.2017. Viitattu 14.12.2021. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS 6000-5-55:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–55: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Muut sähkölaitteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 18.8.2017. Viitattu 12.1.2022. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS 6000-7-712:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7–712: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 18.8.2017. Viitattu 10.12.2021. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 50549-1:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks. Part 1: Connection to a LV distribution network. Generating plants up to and including Type B. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto SFS. Vahvistettu 15.2.2019. Viitattu 6.10.2021. <https://sales.sfs.fi/>, SFS-kauppa.

SG250HX. 2020. Datalehti Sungrow 250 kVA invertterille. Viitattu 1.11.2021. https://en.sungrowpower.com/upload/file/20210108/DS_20201121_SG250HX%20Datasheet_V1.5.4_EN.pdf.pdf.

Solar Panel MPPT Explained. N.d. Artikkelin aurinkopaneelien MPPT-säätimen toiminnasta. Viitattu 26.1.2022. <https://sites.google.com/site/owafksolar/solar-training-workshop/solar-panel-mppt-explained>.

Solarigon palvelut. N.d. Solarigon tarjoamat palvelut. Viitattu 22.10.2021. <https://www.solarigo.fi/palvelut>.

Solarigo Systems Oy. 2020. Solarigon taloustiedot Finderin sivustolla. Viitattu 22.10.2021. <https://www.finder.fi/S%C3%A4hk%C3%B6tukkuliike/Solarigo+Systems+Oy/Pirkkala/yhteystiedot/3089172>.

Stapleton, G. & Neill, S. 2012. Grid-connected Solar Electric Systems. Oxon: Earthscan. Viitattu 28.10.2021. <https://www.scribd.com/document/430541516/grid-connected-solar>.

Sähköasennuksia koskevat standardit. N.d. Artikkelin sähköasennuksien standardeista Seskon sivustolla. Viitattu 8.11.2021. https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoasennukset.

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Lainsäädäntö sähkömarkkinoista Finlexin sivustolla. Viitattu 13.10.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=S%C3%A4hk%C3%B6markkinalaki>.

Sähkön pientuotanto. 2020. Artikkelin sähkön pientuotannosta Motivan sivustolla. Viitattu 13.10.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto.

The hidden hazards of ground faults in PV systems. N.d. Artikkelin aurinkosähköjärjestelmien maasuluista Fluken sivustolla. Viitattu 11.1.2022. <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/grounding/dc-ground-faults-pv-systems>.

Tulosten toteuttaminen. 2021. Artikkelin tutkimuksen toteuttamisesta Jyväskylän yliopiston Koppa palvelussa. Viitattu 26.2.2022. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/tutkimusprosessi/tutkimuksen-toteuttaminen>.

Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 2015. Projektikehittäjän opas IFC:n sivustolla. Washington: International Finance Corporation. Viitattu 27.10.2021. <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report+Web+08+05.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG>.

Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. 2021. Artikkelin verkkoon liitettyistä aurinkosähköjärjestelmistä Motivan sivustolla. Viitattu 22.10.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma.

Verkkotoiminnan luvanvaraisuus. N.d. Artikkelin verkkotoiminnan luvanvaraisuudesta Energiaviraston sivustolla. Viitattu 13.9.2021.2021. <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus>.

Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset. 2018. Helsinki: Fingrid. Viitattu 13.9.2021. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkon-siirto/vjv2018.pdf>.

Vuori, J. N.d. Laadullinen sisällönanalyysi. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietokirjo. Viitattu 7.2.2022. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/laadullinen-sisallonanalyysi/>.

What is a Micro Inverter? 2014. SMA Solarin opetusvideo mikroinverttereistä. Lataaja SMA Solar Technology. Viitattu 2.11.2021. https://www.youtube.com/watch?v=77QAOI7sXt4&ab_channel=SMASolarTechnology.

Which Is Better – Solar String Inverter Vs Central Inverter. 2017. Artikkelin ketju- ja keskusinvertterien vertailusta Novergy Energy Solutionsin sivustolla. Viitattu 2.11.2021. <https://www.novergysolar.com/better-solar-string-inverter-vs-central-inverter/>.

Liitteet

Liite 1. Suositeltavat tuotantolaitteistojen tekniset vaatimukset

Taulukko C.1 — Parametritaulukko				X tarkoittaa, että jakeluverkonhaltija saattaa vaatia tästä taulukosta poikkeavia asetuksia 50 - 1000 kW tuotantolaitteistoille	O tarkoittaa, että asetusta ei vaadita, mutta sitä voi käyttää, jos asetusta ei haluta jättää tyhjäksi
Standardin kappale	Parametri	Suositeltavat oletusasettelut, enintään 1000 kW tuotantolaitteistot		Verkonhaltijakohtainen asettelu mahdollinen 50 - 1000 kW tuotantolaitteistoille (X)	Ei vaadita (O) (VJV:n laiteluokka A:n mukaiset tuotantolaitteistot)
4.3.2 Interface switch	Single fault tolerance for interface switch required	ei // no			
4.4.2 Operating frequency range	47,0 – 47,5 Hz Duration	0 s			
	47,5 – 48,5 Hz Duration	30 min			
	48,5 – 49,0 Hz Duration	30 min			
	49,0 – 51,0 Hz Duration	rajoittamaton // unlimited			
	51,0 – 51,5 Hz Duration	30 min			
4.4.3 Minimal requirement for active power delivery at underfrequency	Reduction threshold	49,0 Hz			
	Maximum reduction rate	10 % P _M /Hz			
4.4.4 Continuous operating voltage range	Upper limit	110% U _n			
	Lower limit	85% U _n			
4.5.2 Rate of change of frequency (ROCOF) immunity	ROCOF withstand capability (defined with a sliding measurement window of 500 ms) non-synchronous generating technology: synchronous generating technology:	2 Hz/s (sekä tahti- että invertterikytketyille // same for non-synchronous and synchronous generating technology)			
4.5.3.2 Generating plant with non-synchronous generating technology	Maximum power resumption time	1 s			O
	Voltage-Time-Diagram	Aika // Time [s]	U (jännite // voltage) [p.u.]		O
		0	0,05		O
		0,15	0,05		O
		1,5	0,85		O
4.5.3.3 Generating plant with synchronous generating technology	Maximum power resumption time	3 s			O
	Voltage-Time-Diagram	Aika // Time [s]	U (jännite // voltage) [p.u.]		O
		0	0,05		O
		0,15	0,05		O
		0,15	0,7		O
	0,7	0,7		O	
	1	0,85		O	

		Aika // Time [s]	U (jännite // voltage) [p.u.]			
4.5.4 Over-voltage ride through (OVRT)	Voltage-Time-Diagram				0	
			0	1,25		0
			0,1	1,25		0
			0,1	1,2		0
			5	1,2		0
			5	1,15		0
			60	1,15		0
		60	1,1		0	
4.6.1 Power response to overfrequency	Threshold frequency f_1	50,5 Hz				
	Droop	4 %				
	Power reference	Pmax				
	Intentional delay	0-2 s				
	Deactivation threshold f_{stop}	ei käytössä // not used				
	Deactivation time t_{stop}	ei käytössä // not used				
	Acceptance of staged disconnection	ei sallita // not allowed				
4.6.2 Power response to underfrequency	Threshold frequency f_1	49,5 Hz			0	
	Droop	4 %			0	
	Power reference	Pmax			0	
	Intentional delay	0 s			0	
4.7.2.2 Capabilities	Active factor range overexcited	0,9				
	Active factor range underexcited	0,9				
4.7.2.3 Control modes	Enabled control mode	Q setpoint			X	
4.7.2.3.2 Setpoint control modes	Q setpoint and excitation	0			X	
	cos φ setpoint and excitation	1			X	
4.7.2.3.3 Voltage related control modes	Characteristic curve	ei käytössä // not used			X	
	Time constant	10 s			X	
	Min cos φ	0,9			X	
	Lock in power	ei käytössä // not used			X	
	Lock out power	ei käytössä // not used			X	
4.7.2.3.4 Power related control mode	Characteristic curve	ei käytössä // not used			X	
4.7.4.2.2 Zero current mode for converter connected generating technology	Enabling	ei käytössä // not used				
	Static voltage range overvoltage	120 % U_n				
	Static voltage range undervoltage	50 % U_n				
4.9.3 Requirements on voltage and frequency protection	4.9.1 Threshold for protection as dedicated device [in A or kW, kVA]	50 kW Huom! Uusi vaatimus 50 - 1000 kW tuotantolaitteistoille! Täytyy löytyä rele+kytkinlaite! (circuit breaker/switch/contactor)				
	Undervoltage threshold stage 1	0,8 U_n			X	
	Undervoltage operate time stage 1	1,5 s			X	
	Undervoltage threshold stage 2	0,2 U_n (Oletuksena ON, verkonhaltijan määriteltävissä ON/OFF // Default ON, system operator may define ON/OFF)			X	
	Undervoltage operate time stage 2	0,25 s (Oletuksena ON, verkonhaltijan määriteltävissä ON/OFF // Default ON, system operator may define ON/OFF))			X	
	Overvoltage threshold stage 1	1,2 U_n			X	
	Overvoltage operate time stage 1	1 s			X	
	Overvoltage threshold stage 2	ei käytössä // not used			X	
	Overvoltage operate time stage 2	ei käytössä // not used			X	

4.10.2 Automatic reconnection after tripping	Lower frequency	49,0 Hz		
	Upper frequency	51,0 Hz		
	Lower voltage	0,85 Un		
	Upper voltage	1,10 Un		
	Observation time	60 s		
	Active power increase gradient	Enintään // Maximum: 100 % / min		
4.10.3 Starting to generate electrical power	Lower frequency	49,0 Hz		
	Upper frequency	51,0 Hz		
	Lower voltage	0,85 Un		
	Upper voltage	1,10 Un		
	Observation time	60 s		
	Active power increase gradient	Enintään // Maximum: 100 % / min		
4.11.1 Ceasing active power	Remote operation of the logic interface	Kyllä; portti täytyy löytyä, mutta verkonhaltija päättää, käytetäänkö sitä // Yes; remote operation must be possible, but system operator decides whether it is used		
4.11.2 Reduction of active power on set point	Remote operation NOTE: if yes further definition is provided by the DSO	ei // no		0
4.12 Remote information exchange	Remote information exchange required NOTE: if yes further definition is provided by the DSO	ei // no		0
Loss of Mains -suojaus / Loss of Mains protection	Käytetty funktio / Used function	Hyväksytyt funktiot / Accepted functions: - ROCOF 2 Hz/s (vain alle 50 kW! // Only generating plants less than 50 kW!) - Vector shift 10 astetta // degrees - Aktiivimetodit inverttereissä // Inverter active methods	X	
	Toiminta-aika / Operation time	0,5 s Voidaan poiketa verkonhaltijan harkinnalla, mikäli LoM-suojaus on luotettava // DSO may choose otherwise, if LoM protection is reliable		X