



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Samu Väisänen

Kiinteistöasenteisen aurinkosähköjärjestelmän kytkentä kysyntäjoustojärjestelmään

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

23.8.2019

Tekijä Otsikko	Samu Väisänen Kiinteistöasenteisen aurinkosähköjärjestelmän kytkentä kysyntäjoustojärjestelmään
Sivumäärä Aika	28 sivua + 1 liite 23.8.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	-
Ohjaajat	Business Development Manager Olli Huotari Yliopettaja Kari Salmi
<p>Insinööriyön aiheena oli selvittää Fortumin aurinkovoimaportfolioon kuuluvien kiinteistöasenteisten aurinkovoimalaitosten kykyä osallistua reservi- ja säätösähkömarkkinoille tuotannon kysyntäjouston näkökulmasta. Työssä kiinteistöt toimivat virtuaalivoimalana, joiden sähköverkosta ottamaa kuormaa voidaan säätää ohjaamalla aurinkovoimalaitosten tuotantotehoa kysyntäjoustojärjestelmästä käsin.</p> <p>Tavoitteena oli selvittää yhteensopiva automaatiotekninen ratkaisu laitojen inverttereiden etäohjaukseen laitoksilla käytettävien komponenttien tai muiden laitteiden avulla. Yhteensopivan ratkaisun löydyttyä Suomenojan koelaitoksella toteutettiin vasteaikakoe, jonka perusteella määriteltiin, mille markkinapaikalle kyseisellä ratkaisulla voidaan teknisesti osallistua. Koetulokset osoittivat, että Huawei SUN2000 36 KTL -invertterillä sekä Meteocontrol blue'Log X-series SCADA:lla varusteltu laitos kykenee reagoimaan keskimäärin 4,7 sekunnissa blue'Login etäkäyttöjärjestelmästä tulevaan ohjaussignaaliin. Vasteajan perusteella voitiin päätellä, että laitoksilla on mahdollista osallistua FCR-N- ja aFFR-markkinapaikoille sekä säätösähkömarkkinoille. SCADA:n RPC-rajapintaa hyödyntämällä on mahdollista etäohjata useampaa laitosta kootusti ja käyttää niitä markkinapaikoilla lähtökohtaisesti aläsäätöön. Insinööriyön tavoitteisiin päästiin, mutta aihe vaatii laajempaa taloudellista tarkastelua, ja automatisoitu kysyntäjousto vaatii ohjauslogiikan luomista.</p> <p>Työ vaatii kysyntäjousto- ja energiamurroksen käsitteisiin, energiamarkkinoihin sekä teknologiaan perehtymistä. Tämä sisälsi manuaalien, verkkoaineistojen ja -raporttien lukemista sekä laitetoimittajien edustajien ja asiantuntijoiden haastattelua. Insinööriyö edisti Fortumin aurinkovoima- sekä kysyntäjoustopuoteryhmien integroimista.</p>	
Avainsanat	kysyntäjousto, aurinkovoima, energiamurros, sähkömarkkinat

Author Title	Samu Väisänen Implementation of a building-mounted PV plant to a demand response system
Number of Pages Date	28 pages + 1 appendix 21 August 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	-
Instructors	Olli Huotari, Business Development Manager Kari Salmi, Principal Lecturer
<p>The subject of this Bachelor's thesis was to research Fortum's building-mounted grid-integrated solar power plant's ability to participate in reserve and frequency balancing power markets. The buildings are considered as a virtual power plant, whose grid intake can be moderated by controlling PV production from a demand response system.</p> <p>The goal was to investigate a compatible controlling solution to remote control inverters using devices used in the PV plants or by other components. After finding a compatible solution, a response time test was carried out at Suomenoja test site to determine which market place the solution could participate in. Test results showed that building-mounted PV plants equipped with a Huawei SUN2000 36 KTL inverter and a Meteocontrol blue'Log X-series SCADA is capable of responding averagely in 4,7 seconds to a control signal from blue'Log's remote access system. The results of the response test show that the virtual power plant is technically able to participate in the FCR-N, aFRR and the Balancing power (mFRR) markets. Multiple PV plants can be combined as one fleet and used to downshift in the markets. This could be done by utilizing Meteocontrol's RPC-interface for the SCADA. The goal of the thesis was achieved, but the subject requires more financial analyzing, and creation of control logic is required for the automated demand response.</p> <p>The thesis required familiarization of the demand response concept, energy transition, energy market and technology. The work included studying manuals, web materials, reports and interviewing representatives of device manufacturers and specialists. This thesis helped the integration of Fortum's solar power and demand response product groups.</p>	
Keywords	demand response, PV, energy transition, power market

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kysyntäjousto	2
2.1	Fortum SolarPlus	2
2.2	Energiamurros ja kysyntäjousto käsitteenä	2
2.3	Kysyntäjouston osallistuminen säätösähkömarkkinoille	7
3	Aurinkovoimalaitoksen kytkeminen kysyntäjousto	10
3.1	Tutkimusaihe	10
3.2	Kiinteistöasenteinen aurinkosähköjärjestelmä	11
3.3	Suomenojan testilaitos ja sen kiinteistösähköjärjestelmä	14
3.4	Kysyntäjouston ohjauksen toteutus	20
3.5	Järjestelmän koeponnistus Suomenojan testilaitoksella	23
3.6	Tulokset ja analysointi	24
4	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Lyhenteet

Aggregaattori	Yritys, joka kerää pienkulutuksesta ja -tuotannosta suuremman ohjattavan kokonaisuuden, jolla voi osallistua eri sähkömarkkinoille
Invertteri	Vaihtosuuntaaja. Sähkölaite, joka muuntaa tasavirran vaihtovirraksi.
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> . Vaihtosuuntaajan ominaisuus, joka optimoi DC-tehoa säteilyolosuhteiden mukaan.
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> . Valvomo-ohjelmisto.
VCOM	<i>Virtual Control Room</i> . Meteocontrolin kehittämä selainpohjainen virtuaalivalvomo.
Wp	Wattipiikki, eli aurinkopaneelin nimellisteho tietyssä säteilyolosuhteessa

1 Johdanto

Tämä insinööriyö on Fortum Power and Heat Oy:n toimeksiantama, ja työssä tutkitaan Fortumin aurinkovoimaportfolioon kuuluvien kiinteistöasenteisten aurinkovoimalaitosten kykyä osallistua reservi- ja säätösähkömarkkinoille tuotannon kysyntäjoustopuun avulla. Insinööriyössä tutkitaan automaatioteknistä ratkaisua laitosyksiköiden invertterien etäohjaukseen SCADA:n, Fortum Springin kehittämän kysyntäjoustopuun tai muun laitteen avulla. Tavoitteena on selvittää yhteensopivien ratkaisujen ja koeponnistamien se Fortumin Suomenojan testilaitokselle, josta mitataan ohjauksen vasteaika. Ohjauksvastekokeella voidaan määrittää, toimii ko ohjausjärjestelmä kysyntäjoustopuun käytettävien markkinapaikkojen vaatimalla nopeudella. Mikäli komponentit eivät ole yhteensopivia, tarkoituksena on selvittää jokin vaihtoehtoinen ohjauskeino tai muu kehitysidea selvitystyön eteen päin viemiseksi. Insinööriyön aihe pohjautuu Fortumin strategiaan, jossa sähkön arvoketjua halutaan parantaa uusia palveluita kehittämällä (Rakennamme strategiallamme puhtaampaa maailmaa 2019). Selvitystyö edesauttaa kahden Fortumin tuoteryhmän, aurinkovoiman ja kysyntäjoustopuun integroimisprosessia. Tulevaisuudessa asiakkaalle voidaan tarjota aurinkovoiman lisäksi muita siihen kytkettyjä lisäarvoa kasvattavia palveluita. Tässä insinööriyössä ei kuitenkaan syvennyä aiheen taloudelliseen tarkasteluun, vaan sopivan teknisen ohjausratkaisun löytämiseen ja sen koeponnistamiseen.

Työn toisessa luvussa tutustutaan tausta-aineistoon, jossa avataan energiamurroksen, kysyntäjoustopuun sekä sähkömarkkinoiden käsitteitä ja toimintoja. Kolmannessa luvussa käsitellään tutkimuskysymystä, sen ratkaisuja sekä koeponnistuksen tuloksia Suomenojan kiinteistöasenteisella aurinkovoimalaitoksella. Neljännessä luvussa on yhteenveto insinööriyöstä kehitysideoineen.

2 Kysyntäjousto

2.1 Fortum SolarPlus

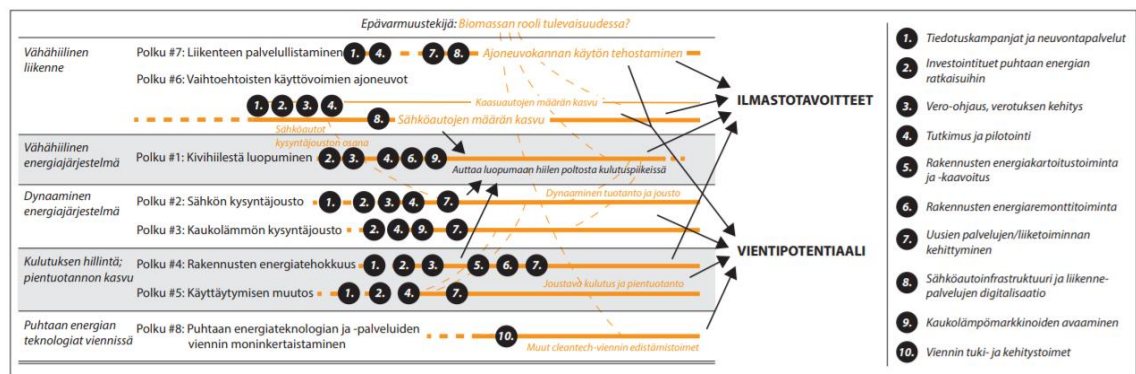
Vuonna 2017 perustettu SolarPlus on Fortum Power and Heat Oy:n sisäinen startup-yritys, jonka liiketoiminta keskittyy aurinkovoimajärjestelmien tarjoamiseen B2B-asiakkailla. SolarPlus-yrityksen yksi merkittävimmistä hankkeista on S-ryhmän sähkönhankintayhtiölle S-Voimalle toteutettu SolariS1-hanke. SolariS1-hankkeessa asennettiin noin 40 aurinkoenergiajärjestelmää S-Marketien, Prismojen ja ABC-liiketilojen katoille noin 10 MW:n edestä. Näiden 37 000 aurinkopaneelin tuottama 9 GWh:n vuosituotanto kattaa 0,8 % S-ryhmän suuresta 1 119 GWh:n sähkönkulutuksesta, jonka osuus on 1,3 % koko Suomen sähkökäytöstä. Vaikka tuotannon osuus S-ryhmän kokonaiskulutuksesta on pieni, hankinta on Pohjoismaiden kaikkien aikojen suurin aurinkosähköjärjestelmien kokonaistoimitus, ja se kasvatti kertaheitolla 30 % koko Suomen aurinkovoimakapasiteettia vuoden 2017 tasosta. (Lampila 2018.) Projektin ansiosta S-ryhmästä tuli Suomen suurin aurinkoenergian tuottaja (S-ryhmästä Suomen suurin aurinkosähkön tuottaja 2018).

2.2 Energiamurros ja kysyntäjousto käsitteenä

Energiamurros on energiajärjestelmän suurten rakenteellisten muutoksen siirtymävaihe, jossa fossiilisista polttoaineista luovutaan asteittain ja siirrytään kohti hiilineutraalia energiayhteiskuntaa. Syyt niin sanotulle energiamurrokselle ovat ilmastonmuutoksen hillitseminen ja sitä varten laaditut kansalliset ja kansainväliset säädökset, jotka ovat ajaneet Suomen energiasektoria suurten rakenteellisten muutosten ääreen. Kiristyvät päästörajat ja lait edellyttävät fossiilisten polttoaineiden käytöstä siirtymistä hiilineutraalimpaan ja uusiutuvampaan suuntaan. Tästä esimerkkinä eduskunnan talousvaliokunnassa 7.2.2019 säädetty laki, jossa kielletään kivihiilen käyttö energiantuotannossa, poissulken huoltovarmuuskäyttö. 1.5.2029 voimaan tulevalla kivihiilikiellolla varmistetaan, että Suomi luopuu asteittain fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja siirtyy kohti päästötöntä energiajärjestelmää. Laki nähdään myös välillisenä keinona edistää energiamurrosta ja uusiutuvaan energiaan liittyviä investointeja. Energiamurroksen keskeisiä uusiutuvia

energiantuotantokeinoja ovat tuuli- ja aurinkoenergia sekä geoterminen energia ja kestävästi tuotettu biomassa. Lisäksi energiatehokkuus, älyverkko, hajautettu energiantuotanto sekä loppukäyttäjien aktiivinen rooli sähkömarkkinoilla on nostettu keskeisiksi osaluokiksi eduskunnan hyväksymässä lakiesityksessä. (Tenhunen 2019.)

Energiamurrosta on käsitelty laajasti Strategisen tutkimuksen neuvoston Smart energy transition -hankkeen ja Sitran vuonna 2017 tekemässä Murrosareena-loppuraportissa. Murrosareenassa käsitellään energiamurroksen haasteita, ajureita, epävarmuuksia sekä kootaan tarvittavista muutostoimista kahdeksan erilaista muutospolkua, joilla energiamurros voidaan toteuttaa (kuva 1). (Hyysalo ym. 2017: 10–11.) Raportin muutospolku 2:ssa käsitellään dynaamista energijärjestelmää, jossa sähkön kysyntäjousto on pääroolissa. Raportin mukaan Suomeen on tavoitteena kehittää maailman dynaamisimmat älyteknologiaan perustuvat energiamarkkinat sekä saada kysyntäjouston piiriin 2 000 MW loppukäyttäjien sähkökäytöstä vuoteen 2030 mennessä. Potentiaalisia säätökohteita löytyy niin teollisuuden kuin pienkuluttajien puolelta. Raportissa mainitaan, että kuluttajien sähkön kulutusta ja pientuotantoa on mahdollista koota suuremmiksi kokonaisuudeksi, jota käyttää verkon tehonhallintaan. Tämä koottu kysyntäjousto vaatii tutkimus- ja kehitystyötä, uusia palveluita, tiedottamista sekä kuluttajien ohjaamista hintasignaaleilla kysyntäjoustopalveluiden pariin (Hyysalo ym. 2017: 32–34).



Kuva 1. Kahdeksan muutospolkua ja niihin sisältyvät poliittiset toimet ja niiden välisten yhteyksien tarkastelu (Hyysalo ym. 2017: 66)

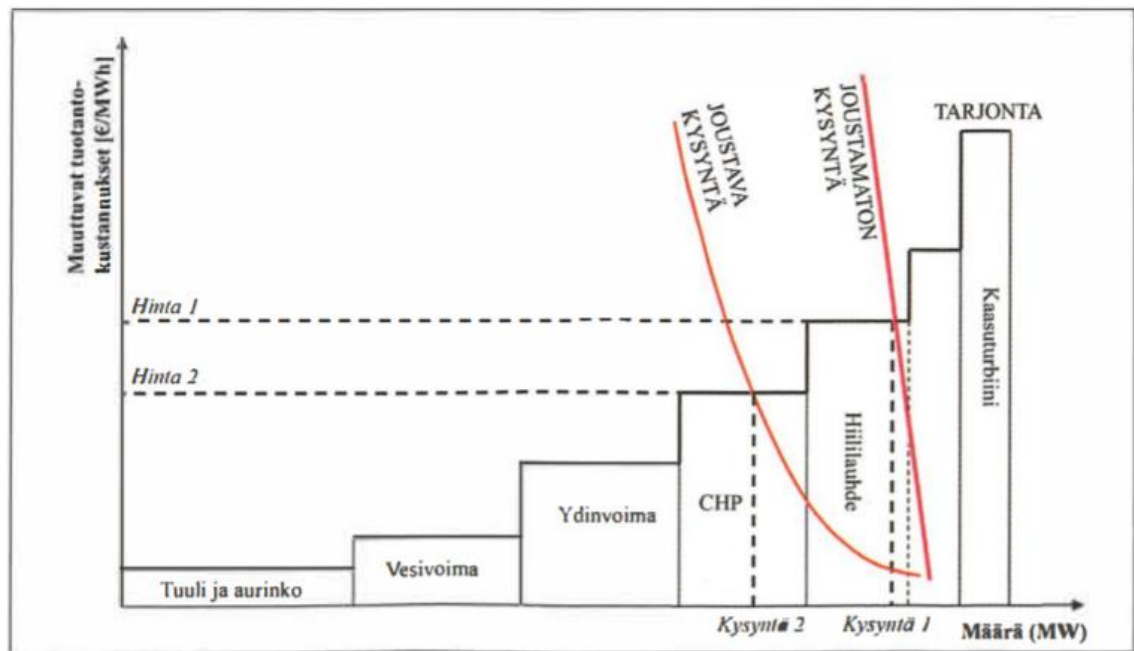
Kysyntäjoukseen perehdyttäessä täytyy ymmärtää, kuinka nykyinen energiajärjestelmä ja sähkömarkkinat toimivat sekä mitä haasteita energiamurros saa näissä aikoina. Sähkön kulutus ja tuotanto olla joka hetki tasapainossa, jotta sähkönjakelujärjestelmä toimisi. Sähkön kulutustaso vaihtelee vuodenajan mukaan, ja kulutuspiikit ajoittuvat päivän aikana eri ajan jaksoille (Hyysalo ym. 2017: 32). Perinteisesti energiantuotantoa ohjataan kulutusprofiilin mukaan. Sääolosuhteista riippuvien uusiutuvien energiamuotojen, kuten tuuli- ja aurinkoenergian, yleistyessä myös tuotannon piikit vaihtelevat vuosi- ja päiväta-solla. Sääriippuvaisten uusiutuvien säätö vastaamaan sähköverkon kulutusprofiilia ei ole taloudellisesti järkevää. Uusiutuvia pyritään ensisijaisesti hyödyntämään, silloin kun niillä tuotettua energiaa on saatavilla, jotta niistä saatava taloudellinen hyöty olisi maksimoitu. (Harsia & Honkapuro 2017.)

Sääriippuvaisten uusiutuvien kapasiteetin kasvu aiheuttaa sähköverkon tehotasapainon hallintaan haasteita ja kasvattaa tuotannon ennustuksen sekä säätövoiman roolia energiajärjestelmässä. Lisäksi haasteena on rajallinen kotimaisen vesivoiman säätökapasiteetti, sekä niin sanotun sähköverkon inertian vähentyminen, kun perinteisiä voimalaitoksia suljetaan. Inertia perustuu konkreettisesti voimaloiden turbiinien ja generaattoreiden hitausmomenttiin, joka hillitsee verkon taajuuden nopeaa vaihtelua. Monissa nykyisissä sähköntuotantomuodoissa, kuten tuulivoimassa, käytetään vaihtosuuntaajaa eli invertteriä, jolla ei ole fyysikaalista hitausmomenttia. Inertian vähentyminen kasvattaa nopeasti reagoivan taajuuden säädön tarvetta tulevaisuudessa. (Mitä on inertia? 2018). Nopeaa taajuudensäätöä voidaan toteuttaa muun muassa kysyntäjoukolla, jota tässä insinööriyössä käsitellään kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan näkökulmasta.



Kuva 2. Sähköstä käydään kauppaa erilaisilla markkinapaikoilla (Johdanto sähkömarkkinoihin 2019)

Sähköstä käydään kauppaa monella markkinapaikalla erilaisilla tuotteilla, joilla on omat toiminnot ja ehdot, kuten kuvassa 2 on esitetty. Tuntitasoinen sähkön markkina- eli spot-hinta muodostuu päivää ennen sähkön toimitusta pohjoismaisessa sähköpörssissä eli NordPoolissa myynti- ja ostotarjousten mukaan. Sähköenergian kysyntä ja sähkön hinta ovat riippuvaisia toisistaan. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä enemmän sähkölle on kysyntää tiettyä ajankohtana, sitä suurempi sähköenergian markkinahinta silloin on. Tähän vaikuttaa se, että tehotarpeen kasvaessa joudutaan käyttöönottamaan käyttökustannuksiltaan kalliimpia tuotantomuotoja. Tämä on esitetty kuvassa 3, jossa hinta 1 muodostuu kun kysyntäjousto ei käytetä ja verkon tehontarpeen täyttämiseksi joudutaan käyttöönottamaan esim. kallista hiililauhdelaitoksia. Hinta 2 muodostuu taas kun verkossa käytetään kysyntäjoustoja. Kysyntäjouston avulla voidaan siis välttää hinta- ja tehopiikeiltä optimoimalla sähköverkkoon kytkettyjä kulutuskohteita sopimaan paremmin sen hetkisen halvimman tuotantomuodon kanssa. (Harsia & Honkapuro 2017.)



Kuva 3. Sähkön markkinahinnan muodostuminen osto- ja myyntitarjousten mukaan kalleimman tuotantomuodon muuttuvien kustannusten mukaan (Harsia & Honkapuro 2017)

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan yleisesti energiankulutuksen siirtämistä korkean kulutuksen tunneilta edullisemmille tunneille säätämällä esimerkiksi kulutuskohteita. Tätä voidaan toteuttaa muun muassa varastoimalla energiaa edullisimmilla tunneilla ja kuluttamalla varastoitu energia kalliimmilla tunneilla, kun sähköverkon kulutus ja markkinahinta on korkealla. Kysyntäjoustopon avulla voidaan siis vähentää säätövoiman tarvetta, turvata tehon riittävyttä, ehkäistä hintapiikkejä sekä vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannossa. (Hysalo ym. 2017: 32.) Tämä on eduksi kaikille loppukäyttäjille, kun tukkusähkön hintataso pysyy stabiilimpana ja pitkällä aikavälillä aiempaa hintatasoa alhaisempaan (Pahkala & ym. 2018: 17).

Tässä insinööriyössä ei käsitellä kysyntäjoustopon kuitenkään energian varastoinnin näkökulmasta, vaan aurinkovoimalaan kytketyn kiinteistön sähkön kulutuksen näkökulmasta, kun aurinkovoimalan tuotantoa säädetään. Aurinkovoimala ja siihen kytketty kiinteistö toimii eräänlaisena virtuaalivoimalana. Kiinteistösähköjärjestelmään kytketyn aurinkovoimalan tuotantoa säädetään kysyntäjoustopon järjestelmästä hetkeksi alas, jotta kiin-

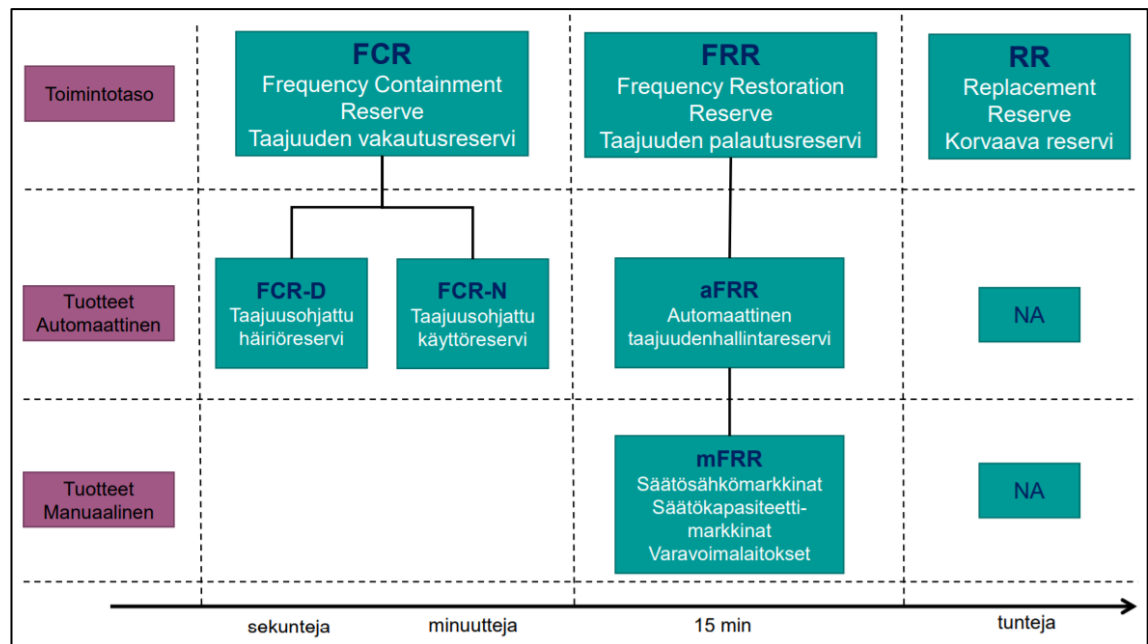
teistö kuluttaisi enemmän sähköä sähköverkosta. Tällä pyritään vaikuttamaan sähköverkon taajuuden nousun hillitsemiseen 50 Hz:n nimellistaajuudesta. Sähköverkon taajuus nousee, mikäli verkkoon on kytketty enemmän tuotantoa kuin kulutusta, ja taajuus laskee mikäli tilanne on toisin päin. Juurikin tätä tehotasapainon hallintaa pyritään ylläpitämään Fingridin reservi- ja säätösähkömarkkinoilla. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 1.)

2.3 Kysyntäjoustop osallistuminen säätösähkömarkkinoille

Sähkön tuotanto ja kulutus eivät aina täsmää vuorokausimarkkinoiden ja päivänsisäisten markkinoiden osto- ja myyntimäärien kanssa, vaikka määrästä hintoineen on sovittu Spot-markkinoilla. Sähkön tuotannon ja kulutukseen liittyy aina ennuste-epätarkkuutta ja hetkellisiä vaihteluita, joita tasapainotetaan Fingridin säätösähkö- ja reservimarkkinoilla. (Sähkömarkkinat 2018).

Kiinteistöasenteisella aurinkovoimalalla voidaan osallistua säätösähkö- ja reservimarkkinoille laskemalla laitoksen tuotantoa hetkellisesti, kun verkon taajuus kasvaa liian suureksi ylituotantotilanteessa. Tällöin aurinkovoimalaitokseen kytketty kiinteistö kuluttaa sähköä normaalisti sähköverkosta hilliten verkon taajuuden nousua 50 Hz:n nimellisarvosta. Aggregoimalla laitoksia suuriksi kokonaisuuksiksi ja etäohjaamalla niitä kootusti saadaan suurempi vaikutus taajuuden nousun hillintään. Haasteena on ennustaa säätökapasiteetin suuruus, sillä pilvisuus vaikuttaa suoraan säädettävän tehon suuruuteen. Paikallisten sääolosuhteiden muutosten vaikutusta säädettävään kokonaisuuteen voidaan kuitenkin välttää, mikäli laitokset ovat maantieteellisesti hajautettuja.

Fingridin mukaan kysyntäjousto voi osallistua periaatteessa kaikille markkinoille kuin tuotantoresurssit, mutta eri markkinapaikkojen tekniset vaatimukset ja korvaukset eroavat toisistaan. Seuraavaksi perehdytään säätösähkö- ja reservimarkkinapaikkoihin. Kuvassa 4 on esitelty eri markkinapaikat.



Kuva 4. Pohjoismaissa käytössä olevat reservit reaktioaikoiheen (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 4)

Tämän työn ulkopuolelle rajataan taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), sillä sen ehtoina ovat kyky vain verkkoon syötettävän tuotannon lisäys tai kuorman tehonpudotus (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat, 2018:7). Tämä ei sovi siksi, koska kiinteistön sähköverkosta ottamaa kuormaa on mahdollista vain lisätä aurinkovoimalan tuotantotehoa pienentämällä normaalitilanteesta. Aurinkovoimalan tuotantotehoa ei voida täten ensisijaisesti kasvattaa.

Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) tulee kyetä kolmen minuutin viiveellä tapahtuvaan lineaariseen ylös- ja alassäätöön minimissään 0,1 MW:n kapasiteetilla. FCR-N:n ohjaus on automaattista, ja se perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen. Säätöjä tapahtuu useita tunnin sisällä, ja siinä on vuosi- sekä tuntikohtaiset markkinat. Tuntikohtaisella markkinalla saadaan korvaus ylläpidetyn kapasiteetin ja nettoenergian mukaan. Korvaus vuosimarkkinoilla on n. 14 €/MW/h ja tuntimarkkinoilla kymmeniä euroja/MWh/a. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 6; Markkinapaikat 2019.) FCR-N on teoriassa mahdollinen markkinapaikka, mikäli ylös- ja alassäätöjä voidaan tehdä aurinkovoimalan ehdoilla. Esimerkiksi ylös- eli tässä tapauksessa kiinteistön sähkönkulutuksen

vähentämistä sähköverkon puolelta ei ole ensisijaisesti mahdollista tehdä nostamalla aurinkovoimalan tehoa, ellei tehonalennuskäsky ole sillä jo hetkellä voimassa.

Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) säätää jatkuvasti kulutuskohteita tai tuotantolaitoksia kahden minuutin viiveellä Fingridin ohjaussignaalin mukaan. Säätöä hankitaan nykyisin vain osalle vuorokauden tunneista ja osallistuja voi tarjota vain ylös- tai alassäätöä minimissään 5 MW:n kapasiteetilla. Osallistujien tarjoukset aktivoidaan tarjouskokojen suhteessa. Korvaus muodostuu kapasiteetista (MW) ja säädön energiamäärästä (MWh). Kapasiteetin hinta on muutamia kymmeniä euroja/MW/h ja energian hinta muodostuu säätösähkömarkkinoiden mukaan. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 9; Markkinapaikat 2019.)

Lisäksi Fingridillä on säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). Säätösähkömarkkinoilla tehdään erikseen ylös- ja alassäätötarjouksia 10 MW:n tai 5 MW:n minimikapasiteetilla, joka pitää kyetä säätöön 15 minuutissa. Tarjouksia voi jättää ja päivittää 45 min ennen toteutusta, ja korvaus lasketaan energian (MWh) sekä kalleimman tunnin aikana käytetyn tarjouksen mukaan. Hintataso on aina parempi kuin Spot-hinta ja voi kohota jopa satoihin tai tuhansiin euroihin. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 10; Markkinapaikat 2019.)

Säätökapasiteettimarkkinoilla jätetään taas tarjouksia kapasiteetista viikkotasolla häiriöreserviä tukemaan. Käytettävissä on vain ylössäätöä, eli verkkoon syöttävien voimalaitosten tehon nostoa tai kuormien pudottamista, joten säätökapasiteettimarkkinat rajataan ulos tarkastelusta. Kiinteistöasenteisella aurinkovoimalaitoksella voidaan tehdä ensisijaisesti vain kuorman lisäystä laitoksen tuotantoa pudottamalla. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 12; Markkinapaikat 2019.)

Jotta aurinkovoimalaitosten tuotannon ohjaus olisi taloudellisesti järkevää, täytyy säädöstä saadun korvauksen olla sähkön Spot-hintaa suurempi. Yhden kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan säätö ei välttämättä ole kovin kannattavaa, mutta usean laitoksen aggregoitu säätö voi olla taloudellisesti kannattavaa. Toukokuussa 2018 kevään tulvista johtuva suuri vesivoimatuotanto sekä suuri tuulivoimatuotanto aiheutti suuren alassäätötarpeen, jossa sähkön hinta oli uhkana painua -1 000 €/MWh, eli sähkönkulutuksesta olisi saanut hyvitystä 1 000 €/MWh. Sähkömarkkinoilla reagoitiin kuitenkin nopeasti, eikä

hinta todellisuudessa painunut negatiiviseksi. Tässä insinööriyössä ei kuitenkaan syvennytä taloudelliseen tarkasteluun, vaan tekniseen ohjausratkaisuun ja sen koeponnistamiseen. (Sähkön ylituotantotilanne mahdollinen 10.5.2018 2018.)

3 Aurinkovoimalaitoksen kytkeminen kysyntäjousto

Kuten edellisessä luvussa on todettu, kysyntäjoustoja tarvitaan energiasuoritusjärjestelmän tuotannon optimoimiseen sekä nopeaan säätöön verkon taajuudenhallintaan uusiutuvien energiamuotojen yleistyessä ja sähköverkon inertian vähentyessä. Säädettävällä kapasiteetilla voidaan käydä kauppaa eri markkina-alustoilla. Tässä kappaleessa selvitetään teknistä ratkaisua aurinkovoimalaitosten etäohjaukseen sekä selvitetään, kuinka nopeasti voimalan laitteisto reagoi kysyntäjoustojärjestelmästä tulevaan käskyyn. Näin voidaan arvioida, mihin markkina-alustoihin kysyntäjoustoilla voidaan teknisesti osallistua.

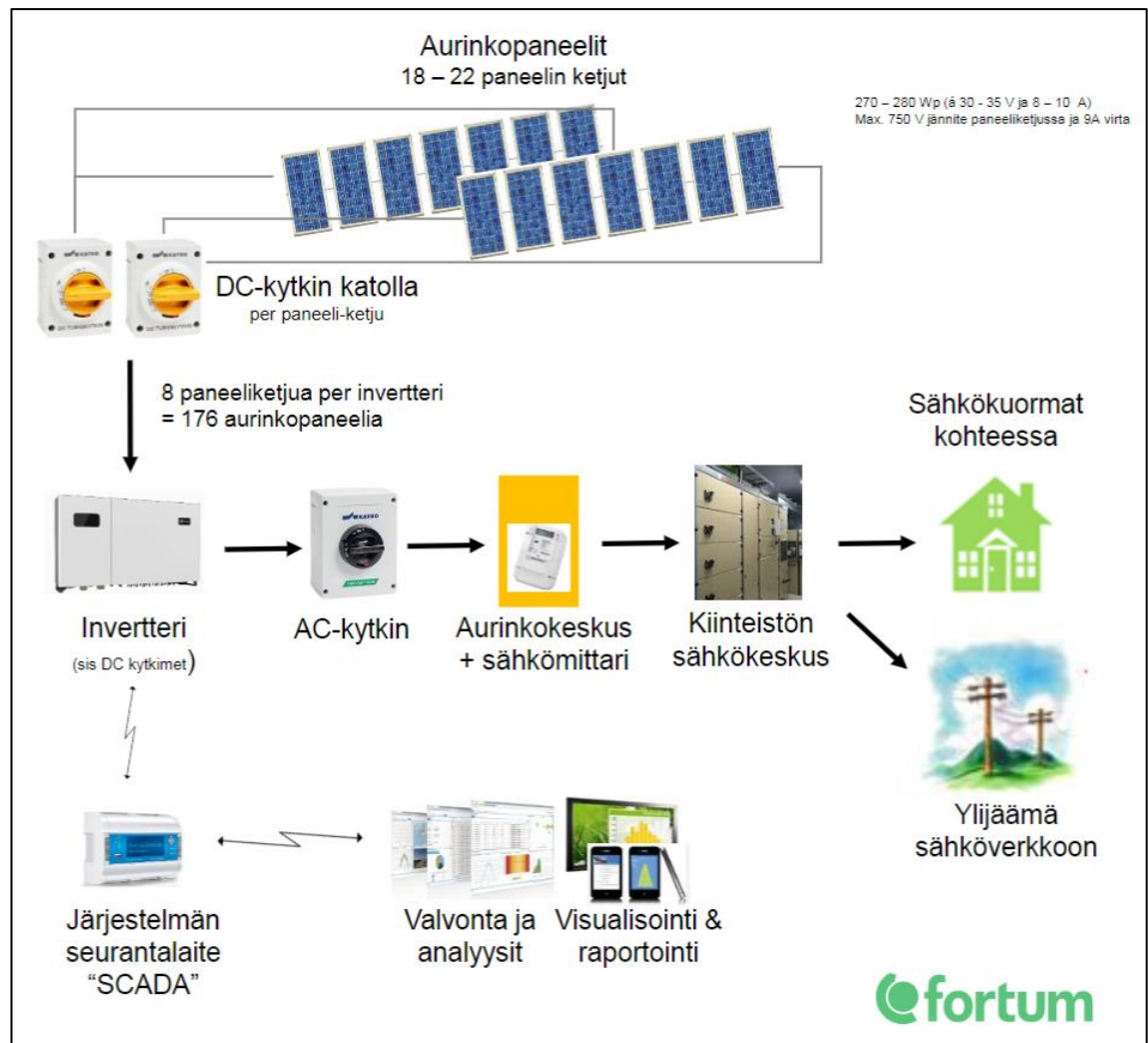
3.1 Tutkimusaihe

Tämän insinööriyön tutkimusaiheena on selvittää Fortumin Suomenojan kiinteistöasenteisen aurinkovoimalaitoksen olemassa oleville komponenteille yhteensopiva etäohjausjärjestelmä tai laite, jolla kysyntäjousto-ohjauksia voidaan lähettää. Mikäli komponentit ovat yhteensopivia ja pystyvät kommunikoimaan keskenään, selvitetään ohjauksen vasteaika. Tämän avulla voidaan määrittää, toimiiko järjestelmä minkäkin säätösähkömarkkinan vaatimalla nopeudella. Jos komponentteja ei saada toimimaan tai mittauksia tehtyä, tarkoituksena on selvittää jokin vaihtoehtoinen ohjauskeino tai muu kehitysidea asian eteen päin viemiseksi. Selvitys tehdään, sillä se edesauttaa aurinkovoiman kysyntäjousto-integroimisprosessia ja voi näin tuoda tulevaisuudessa lisäarvoa tuottavia palveluita Fortumille.

3.2 Kiinteistöasenteinen aurinkosähköjärjestelmä

Kiinteistöasenteisen aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentit koostuvat aurinkopaneeleista, yhdestä tai useammasta vaihtosuuntaajasta eli invertteristä ja tuotannon seurantalaitteesta eli SCADA:sta. Paneelit ovat yleensä kytketty sarjaan paneeliketjuksi eli stringiksi, jotta jännitetaso saadaan tarpeeksi suureksi ja kaapelihäviöitä minimoitua. Paneelit on sijoitettu kiinteistön välittömään läheisyyteen vesikatolle, seinälle tai maahan, sillä järjestelmällä tuotettu sähkö pyritään kuluttamaan kiinteistön kulutuskohteissa.

Paneeliketjut on kytketty invertteriin, joka muuntaa paneelien tuottaman tasavirran kiinteistö sähköjärjestelmässä käytettävään vaihtovirtaan. Invertterin vaihtosähköpuoli on kytketty yleensä kiinteistön ryhmäkeskukseen, jossa toteutetaan myös sähkötuotannon mittaus. Ryhmäkeskus on kytketty joko muihin keskuksiin tai suoraan kiinteistön pääkeskukseen, jonka kautta sähkövirta jaetaan kiinteistön kuormiin tai mahdollisessa ylituotantotilanteessa pääkeskuksen takana olevan muuntajan kautta sähköjakeluverkkoon. Lisäksi invertterit ovat kytketty SCADA:aan, joka välittää reaaliaikaista dataa järjestelmän toiminnasta etävalvontajärjestelmään. Kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan kytkentäperiaate on esitetty kuvassa 5.



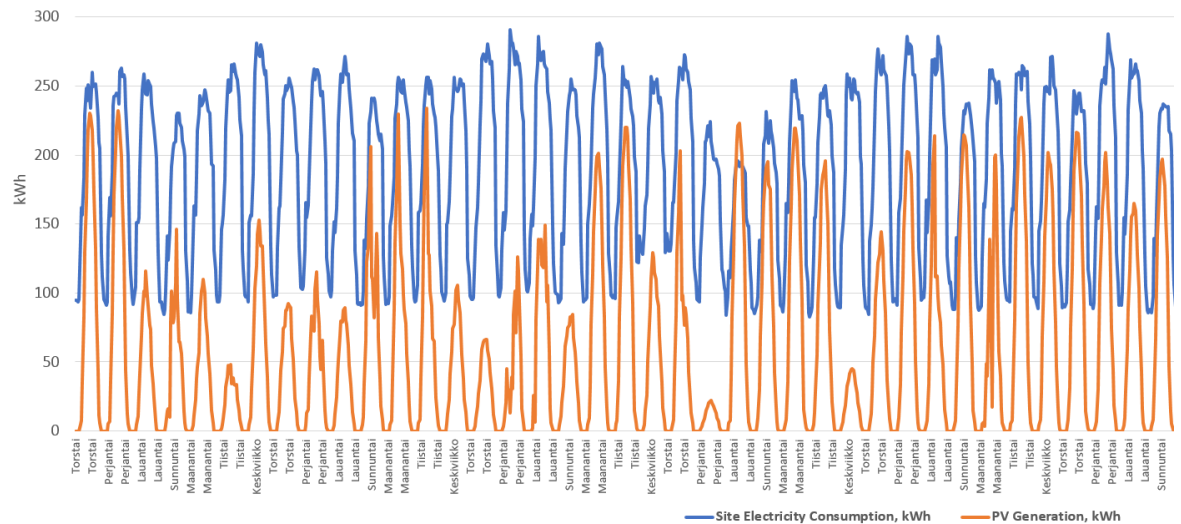
Kuva 5. Aurinkovoimalaitoksen kytkentäperiaate (Aurinkosähköjärjestelmä 2018)

Yleisesti kiinteistöasenteinen aurinkovoimajärjestelmä pyritään mitoittamaan niin, että kaikki järjestelmällä tuotettu energia kulutetaan kiinteistössä, johon aurinkovoimajärjestelmä on kytketty. Ylijäämä sähköä ei kannata myydä jakeluverkkoon, sillä paikan päällä tuotetusta ja kulutetusta sähköstä ei tarvitse maksaa sähkön siirtomaksua eikä sähkövero. Sähkövero tarvitse maksaa tuotetusta energiasta vain, jos vuosituotanto ylittää 800 MWh (Energiaverotus 2016). Ylituotannon myynnistä saa vain sen hetkisen sähkön markkinahinnan verran korvausta. Sähköveron ja siirtomaksun osuudet voivat olla 2/3 sähkömarkkinoilta ostetun sähkön kokonaishinnasta, joten aurinkosähkön myyntitapioitkin ovat saman suuruiset, kuten kuvassa 6 on esitetty (Ylijäämä sähkö myynti 2016.).



Kuva 6. Aurinkosähkön paikallisen käytön hyöty suhteessa ylijäämänsähkön myynnistä saata-
vaan hyötyyn (Ylijäämänsähkön myynti 2016).

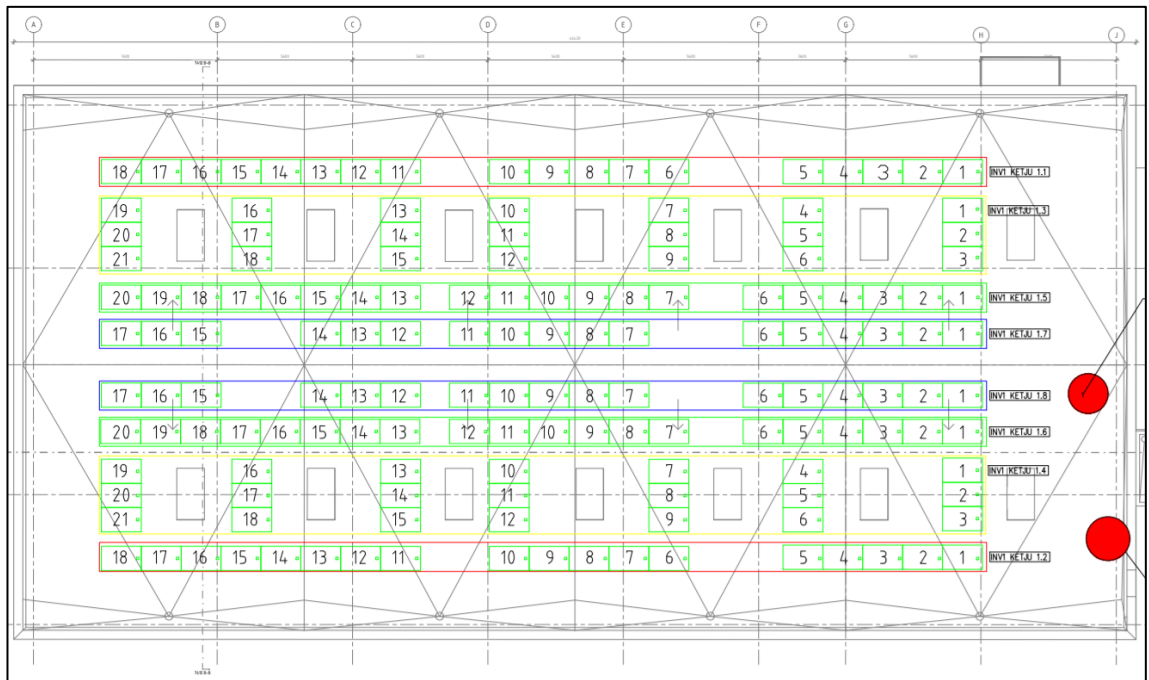
Kuvassa 7 nähdään esimerkkikohteen simuloitu sähkön tuotannon (oranssi) ja kulutuksen (sininen) suhde kesä-heinäkuun aikana. Aurinkosähköljärjestelmän hetkellinen tuotanto voi ajoittain kattaa jopa täysin kiinteistön sen hetkisen sähkönkulutuksen. Tuotannon prosentuaalinen osuus vuosikulutuksesta riippuu paljolti siitä ajoittuvatko kulutus- ja tuotantoprofiilit yhteen päivän aikana. Prosentuaalista osuutta voi kasvattaa aurinkosähköljärjestelmään kytketyillä akuilla, mutta tässä työssä akut rajataan järjestelyistä pois. Mikäli kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan tuotanto kattaa päivällä tietyn osuuden sähkönkulutuksesta, tämä katettu osuus voidaan nähdä potentiaalisena säätökapasiteettina reservi- ja säätösähkömarkkinoilla.



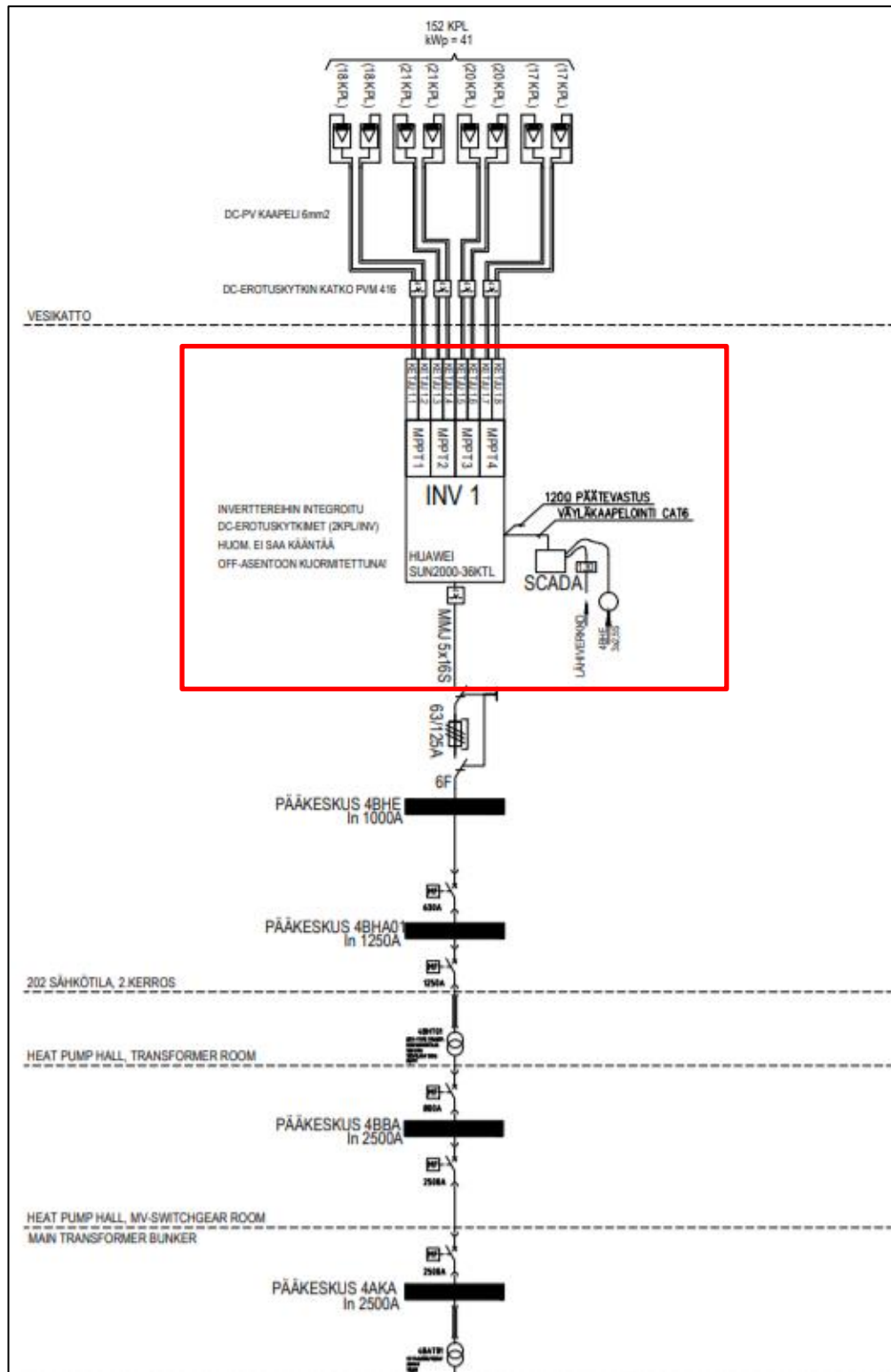
Kuva 7. Esimerkkikohteen simuloitu aurinkosähkön tuotantoprofiili suhteessa kulutusprofiiliin (Aurinkosähkijärjestelmä 2018)

3.3 Suomenojan testilaitos ja sen kiinteistösähkijärjestelmä

Suomenojan aurinkovoimalaitos on Fortumin pilottilaitos, joka on rakennettu Suomenojan voimalaitosalueen lämpöpumppulaitoksen katolle ja on kytketty rakennuksen sähkijärjestelmään. Aurinkosähkijärjestelmän teho on 41,1 kWp (DC) ja koostuu 152:sta Trinasolar 275 Wp:n paneelista, yhdestä 36 kW:n Huawei SUN2000 36 KTL -invertteristä sekä Meteocontrol blue'Log X-series SCADA:sta. Aurinkovoimalan tuotto ei vaikuta merkittävästi lämpöpumppulaitoksen verkkosähkönkulutukseen, vaan laitos rakennettiin edellä mainittujen teknologioiden yhteensopivuuden sekä varjostumien aiheuttamien tuotantotappioiden testaamiseen. Kuvassa 8 on esitetty vesikattokuvan päälle piirretty layout aurinkovoimalasta. Kuvassa 9 on laitoksen nousujohtokaavio, josta selviää, kuinka järjestelmä on kytketty kiinteistösähkijärjestelmään. Tässä työssä tarkasteltava osuus on rajattu punaisella nousujohtokaavioon, joka sisältää invertterin ja SCADA:n.



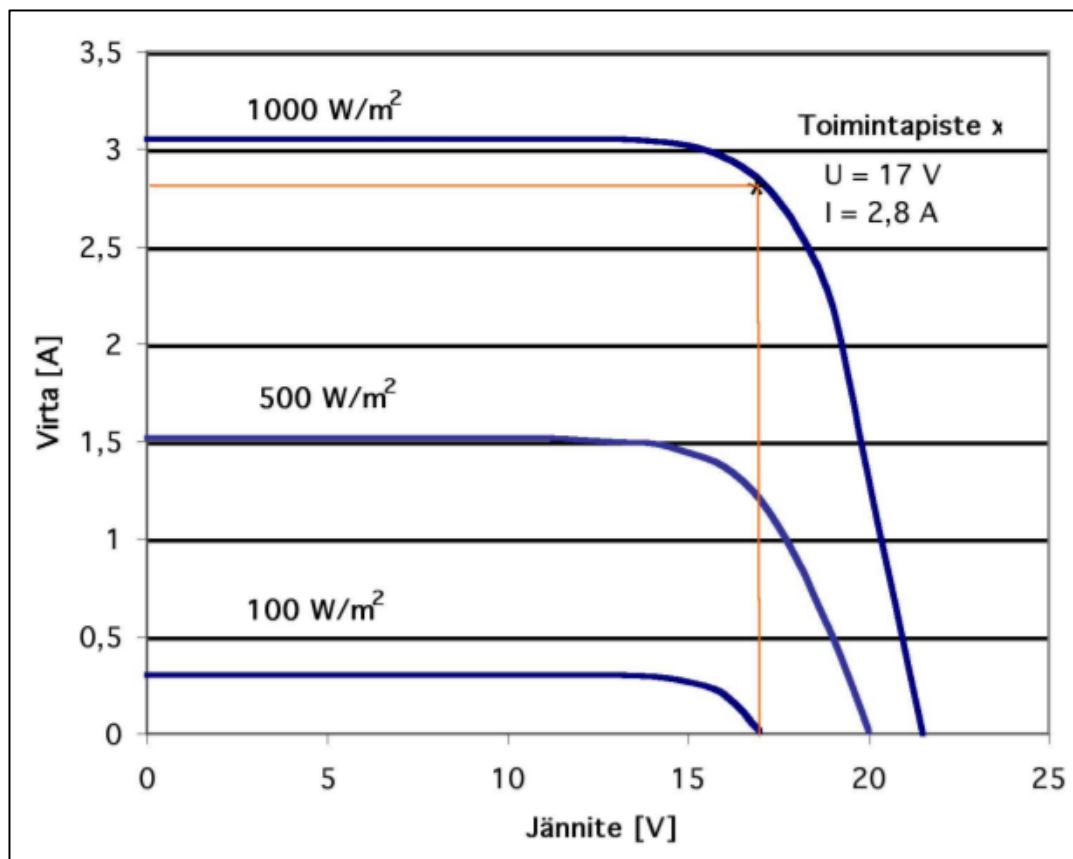
Kuva 8. Suomenojan testilaitoksen paneelisto ja stringitys lämpöpumpulaitoksen vesikatolla (Aurinkosähköjärjestelmä 2018).



Kuva 9. Suomenojan aurinkovoimalaitoksen kytkentä kiinteistön sähköjakaajärjestelmään. Tässä työssä tutkitan punaisella rajattua aluetta (Aurinkosähköjärjestelmä 2018).

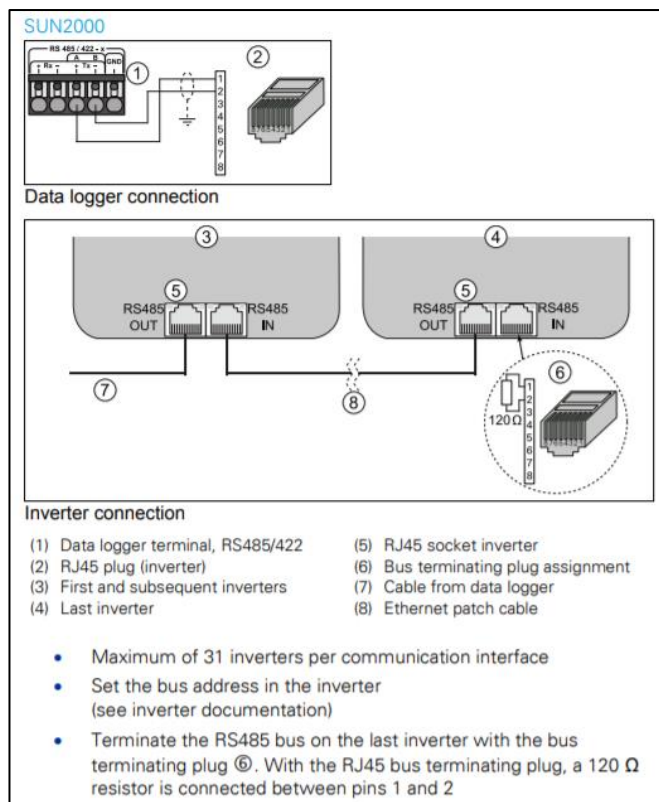
Huawei SUN2000 36 KTL

Huawei SUN2000 36 KTL -invertteri on kaupallisiin käyttötarkoituksiin suunniteltu 36 kW:n kolmivaiheinvertteri. Invertteriin voidaan kytkeä 8 paneeliketjua neljään maksimitoimintapisteen seurantalaitteeseen (*Maximum Power Point Tracking*). Invertterin MPPT:t pyrkivät kukin säätämään niihin kytkettyjen kahden paneeliketjun tehoa säteilyolosuhteiden mukaan. Näin paneeleista saadaan aina säteilyolosuhteisiin nähden suurin mahdollinen teho, eli virran ja jännitteen tulo (kuva 10). Tämän jälkeen DC-virta muunnetaan AC-virraksi, jota voidaan syöttää kulutuskohteisiin. (User Manual 2017: 14–15)



Kuva 10. Aurinkopaneelin maksimitoimintapiste esitettyä 1000 W/m² säteilyssä ja 25 °C:n lämpötilassa (Aurinkopaneelit 2018).

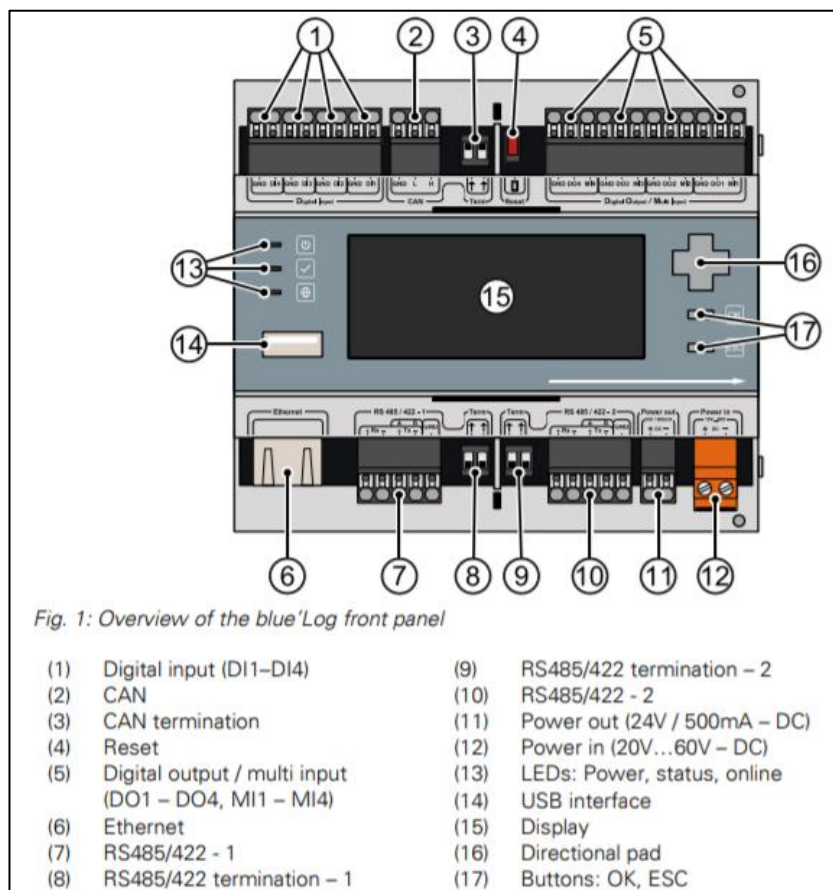
Huawei SUN2000 KTL -invertterissä on MPPT:n lisäksi paljon muuta automatiikkaa, jota voidaan hyödyntää etäohjausta ajatellen. Invertterillä on kolme toimintatilaa: *Standby*, *Operating* ja *Shutdown*. *Operating*-tilassa invertteri muuntaa paneeliketjuilta tulevaa DC-virtaa AC-virraksi MPPT-toimintoa käyttäen ja syöttää sitä kiinteistösähköverkkoon. Invertteri menee *Standby*-tilaan kun paneeliketjujen tuotanto-olosuhteet ovat niin heikot, ettei invertteri pysty tuottamaan vaihtovirralla asetettua laatua (400 V, 50 Hz). Invertteri valvoo jatkuvasti DC-puolen arvoja ja palaa automaattisesti *Operating*-tilaan kunnes ulkoiset olosuhteet paranevat. Lisäksi invertteri menee tuotantotilasta suoraan *Shutdown*-tilaan mikäli automatiikka havaitsee invertterin sisäisen tai ulkoisen vian. Vika voi olla esimerkiksi invertterin ylikuumentuminen tai sähköverkon (AC-puolen) heikko laatu tai sen katkeaminen. (User Manual 2019: 15.) Lisäksi Huawei-invertterin kommunikaatio perustuu ModBus TCP -väyläteknikkaan, joka on teollisuusautomaatikassa yleisesti käytetty tekniikka. Inverttereiden kommunikaatio voidaan ketjuttaa yhdistämällä ne toisiinsa RS485-kaapelilla ja lopulta SCADA:aan kuvan 11 mukaisesti. (Device connection plans 2017).



Kuva 11. SCADA:n ja Huaweiin invertterin välinen kytkentä. Inverttereitä voidaan kytkeä yhteen ketjuun 31 kappaletta (Device connection plans 2017).

Meteocontrol blue'Log X-series

Meteocontrol blue'Log X-series SCADA kerää jokaisen siihen kytketyn invertterin MPPT:n tuotantodatan, hälytykset sekä muut viestit ModBus-väylätekniikkaa käyttäen ja välittää datan VPN-yhteydellä Meteocontrolin selainpohjaiseen virtuaalivalvomoon (VCOM), josta tuotantohistoriaa tai laitosportfolion statusta voidaan seurata etänä. Kuvassa 12 on yleiskuva SCADA:sta kytkentöineen. Huaweiin invertteriltä tuleva datakaapeli kytketään kuvan 12 kohdassa 7 oleviin pinneihin Tx + ja TX -. SCADA:ssa on myös neljä digitaalista tuloa ja lähtöä, joihin voidaan kytkeä muun muassa eri sensoreita tai sähkömittareita, joita voidaan käyttää esimerkiksi tuotanto-olosuhteiden seuraamisessa tai etäohjauksen vasteen mittauksessa. (blue'Log X-Series (XM / XC) 2019.)



Kuva 12. Meteocontrol blue'Log-SCADA:n yleiskuva (Operating manual 2015: 12)

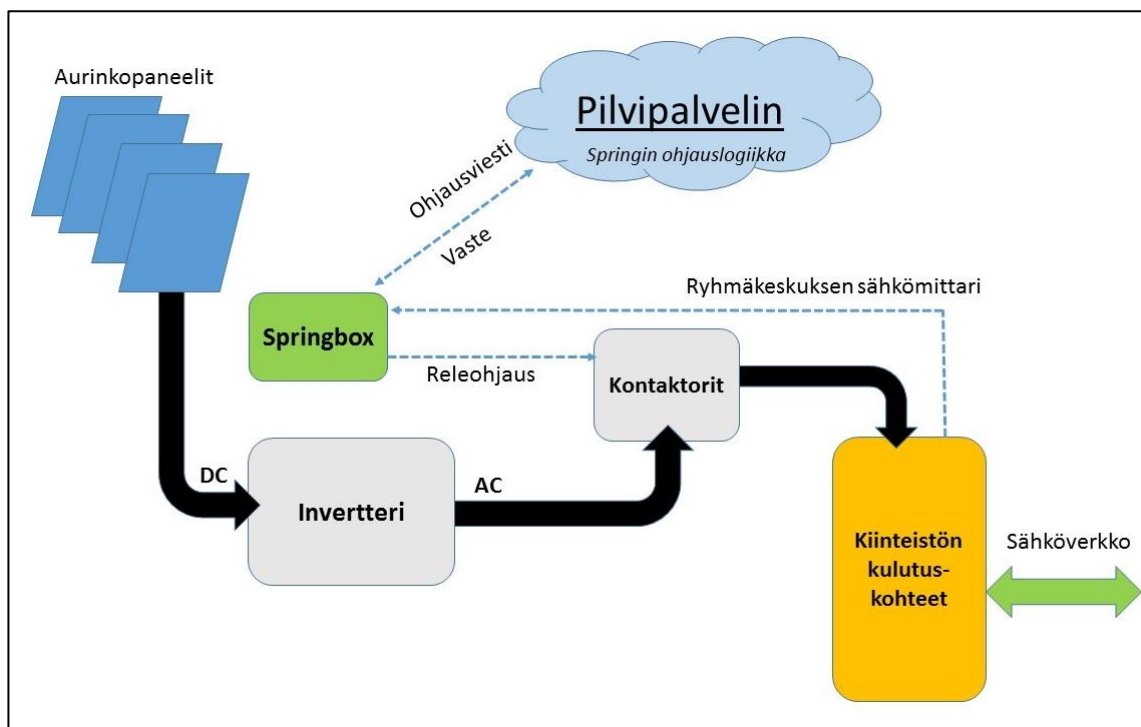
Springbox

Springbox on kysyntäjoustopalveluita tarjoavan Fortum Springin ohjauslaite, jolla toteutetaan kysyntäjoustoja tuhansissa kotitaloudessa, jossa on varaava sähkölämmitys. Springboxissa on relelähtö ja muutamia sisääntuloja, joihin voidaan kytkeä eri antureita. Springin pilvipalvelimelta toimiva ohjauslogiikka lähettää ohjauskäskyjä Springboxin releelle, joka kytkee lämminvesivaraajien vastuksia pois päältä tai päälle verkon taajuuden mukaan. (Manner 2019.) Mukautettua Springboxia tutkitaan yhtenä vaihtoehtoisena ohjaustapana tässä insinööriyössä.

3.4 Kysyntäjoustopalvelun ohjauksen toteutus

Ohjauksen toteuttaminen ja vasteen mittaaminen voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla. Springboxilla on mahdollista toteuttaa karkeaa säätöä ja SCADA-valmistaja Metecontrol tarjoaa aurinkovoimalaitosten etäohjaukseen omaa palveluaan, joka on yhteensopiva Huawei-inverttereiden kanssa. Seuraavaksi selostetaan kumpikin ohjaustapa.

Springboxilla ja invertterin AC-lähtöjen yhteyteen asennettavilla kontaktoreilla voidaan ohjata inverttereiden tehoa karkeasti päälle ja pois päältä. Kuten aiemmin on mainittu, invertteri menee *Shutdown*-tilaan, mikäli AC-verkko katkeaa tai sen laatu ei vastaa asetettuja arvoja. Kun AC-puoli kytketään takaisin, invertterin tuotannon ylösajo tapahtuu automaattisesti (User Manual 2017; 15,98–104). Springboxia voidaan käyttää etäohjaukseen seuraavanlaisesti (kuva 13). Springbox saa ohjauskäskyn internetyhteydellä Springin kysyntäjoustopalvelujärjestelmästä. Käsky ohjaa Springboxin relettä, joka taas ohjaa kontakteja, jotka kytkevät invertterin AC-puolen pois tai takaisin päälle. Ohjausvaste mitataan ryhmäkeskuksen esimerkiksi sähkömittarin valopulssista.

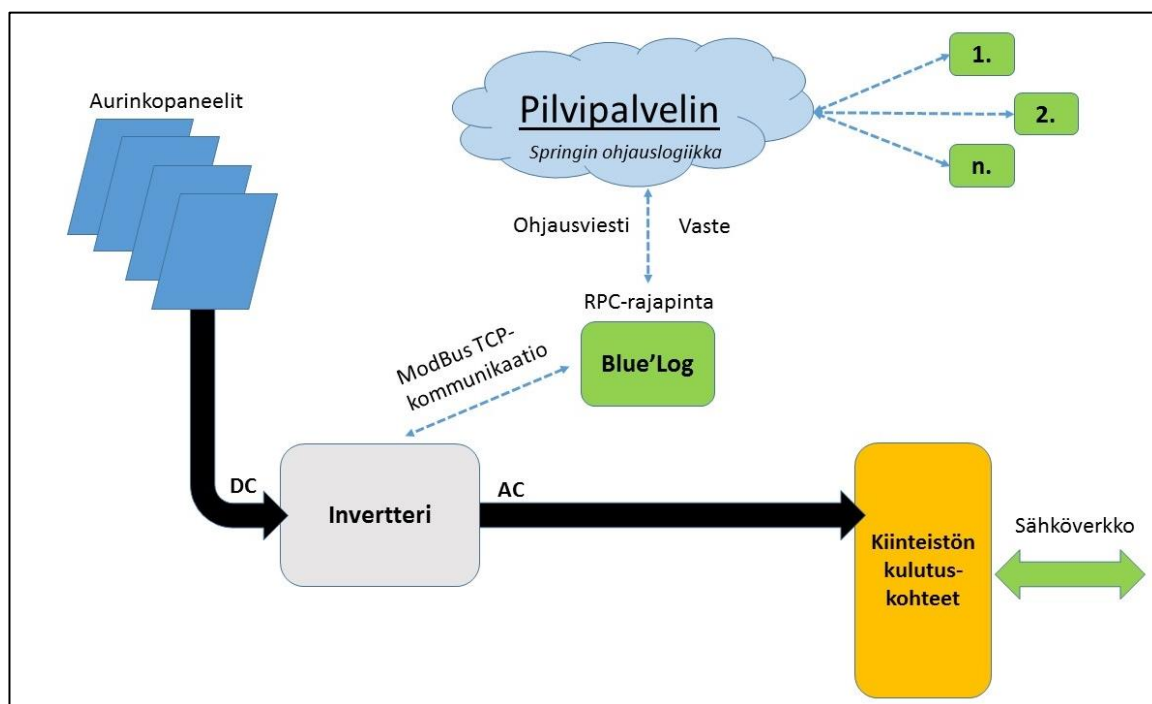


Kuva 13. Ohjausmenetelmä Springboxia käyttäen

Tämä ohjaustapa on teoriassa toteutettavissa, mutta pitkällä aikavälillä invertterin hallitsematon alasajo AC-virtaa äkillisesti katkaisemalla ei välttämättä ole suositeltavaa laitteen käyttöään kannalta. Lisäksi Huawei SUN2000 36KTL-invertterin päällekytkentä lepoutilasta kestää noin minuutin (oma havainto). Tämän takia Springbox kontaktoreiden kanssa rajataan pois toteutusvaihtoehdoista, sillä ohjaustapa ei ole invertterin käyttötarkoituksen mukainen ja päällekytkennän viive on epämääräinen.

Toinen ohjaustapa on hyödyntää koelaitoksella valmiina olevaa Meteocontrolin blue'Log X-sarjan SCADA:aa. Meteocontrol tarjoaa lisenssiä nimeltä RPC (Remote Power Control), jonka avaa avoimen rajapinnan blue'Log X-sarjan SCADA:aan. RPC-rajapinta mahdollistaa inverttereiden etäohjauksen esimerkiksi pilvipalvelimen kautta. Pilvipalvelimesta voidaan lähettää VPN-yhteyden välityksellä ModBus-komentoja, jotka menevät SCADA:n kautta invertterille. (Remote Power Control (RPC) – Direct Marketing 2017).

Kaavio kytkennästä on esitetty kuvassa 14. Avoin RPC-rajapinta mahdollistaa laitoskonaisuuksien, eli useamman SCADA:n ja niihin kytkettyjen inverttereiden etäohjauksen. Automatisoidulle ohjaukselle ei ole kuitenkaan Meteocontrolilta valmista ohjauslogiikkaa vaan sellaisen joutuu itse ohjelmoimaan. Lähtökohtaisesti RPC on suunniteltu Saksan sähkömarkkinoille, jossa verkkoyhtiöillä pitää olla mahdollisuus rajoittaa ylituotannon syöttöä sähköverkkoon. Saksassa verkkoyhtiöillä on omat järjestelmät, jotka keskustele- vat RPC:n kanssa, eikä siksi valmista ohjausjärjestelmää ole luotu. (Knoblauch 2019).



Kuva 14. Ohjausmenetelmä SCADA:n RPC-rajapintaa hyödyntäen

RPC:n lisäksi blue'Log X-series SCADA:n ohjelmisto täytyy päivittää uuteen XC-versioon, joka mahdollistaa valvonnan lisäksi erilaisten ohjausviestien lähettämisen manuaalisesti blue'Login etäkäyttöjärjestelmästä. XC-version avulla invertterille voidaan antaa prosentuaalinen tai absoluuttinen tuotantotehon raja, jota se ei ylitä, vaikka paneeleilta saataisiinkin enemmän tehoa. Myös tehon muutosnopeutta on mahdollista säätää, mikäli sähköverkko on altis suurille heilahteluille tehon vaihdellessa. Lisäksi ohjaus voi olla

avointa tai takaisinkytkettyä. Takaisinkytketyssä ohjauksessa otetaan huomioon häiriöt, kun taas avoimessa ohjauksessa ei. (blue'Log XC 2019.) RPC-lisenssi avaa periaatteessa XC-päivityksen ominaisuudet rajapinnan kautta vapaampaan käyttöön, jolloin ohjaukset voidaan tuoda suoraan muualta kuin blue'Login omasta etäkäyttöjärjestelmästä.

3.5 Järjestelmän koeponnistus Suomenojan testilaitoksella

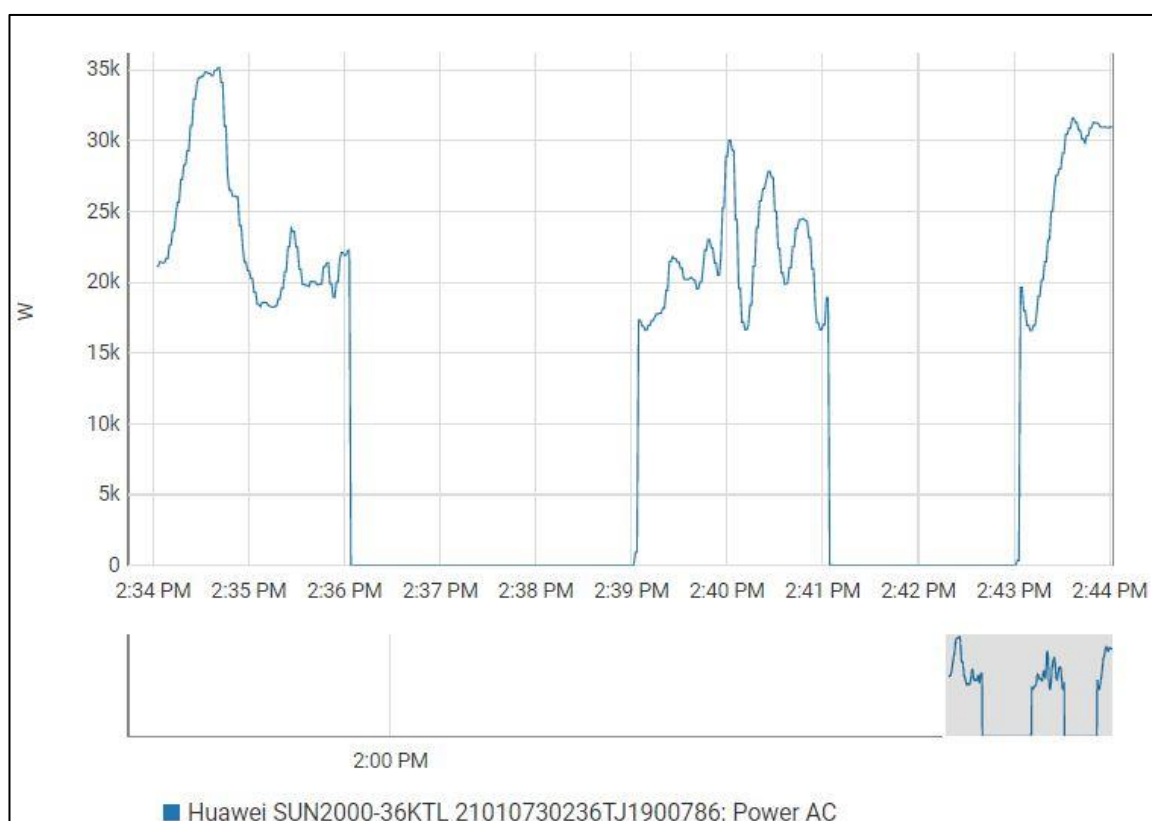
Suomenojan testilaitoksella toteutettiin ohjaukset lähetäminen ja vasteajan määrittäminen manuaalisesti SCADA:n XC-ohjelmistoversiolla, sillä resurssit eivät riittäneet automatisoidun RPC-ohjauksjärjestelmän luomiseen. Testilaitoksen SCADA päivitettiin XC-versioon, joka mahdollisti vasteaikakokeen suorittamisen etänä blue'Login etäkäyttöjärjestelmän kautta.

Koejärjestely toteutettiin seuraavasti:

Tuotantotehoa seurattiin blue'Login etäkäyttöjärjestelmän kuvaajasta, johon teho päivittyy sekunnin välein. Ohjaukset lähetettiin ja niiden toteutumista seurattiin etäkäyttöjärjestelmän kuvaajasta. Tehoa säädettiin 100 %:sta 0 %:iin ja toisinpäin. Toistoja tehtiin 30 kpl ja lopulta tulokset koottiin Excel-muotoon, josta invertterien keskimääräinen reaktionopeus ja muut tulokset laskettiin. Kokonaisvasteajan laskemisessa oli epätarkkuuksia, sillä etäkäyttöjärjestelmästä ei näe, milloin ohjaussignaali on vastaanotettu SCADA:aan. Vasteaika määritettiin karkeasti etäkäyttöjärjestelmästä tarkkailemalla, kuinka kauan inverttereillä kestää päästä asetusarvoon, kun tehokäsky on lähetetty. Mittaamiseen käytettiin sekuntikelloa, sillä blue'Login etäkäyttöjärjestelmän kuvaajan sekä Excel-raportin tarkin mitta-asteikko on yksi minuutti. Mittaustapa sisältää inhimillisen mitatausepävarmuuden sekä viiveen, joka muodostuu internetin välityksellä.

3.6 Tulokset ja analysointi

Kuvassa 15 nähdään otos vasteaikatestistä. Tarkemmat koetulokset löytyvät liitteestä 1. Kuten kuvaajasta näkee, invertteri reagoi nopeasti tasaminuuteille ajoitettuihin tehokäskyihin, jotka lähetettiin manuaalisesti etäkäyttöjärjestelmästä. Käskyillä asetettiin invertteristä sillä hetkellä saatava teho 0 %:iin tai 100 %:iin. Keskimääräinen vasteaika oli 4,7 sekuntia. Nopein vasteaika oli 3,3 sekuntia kun taas hitain oli 5,9 sekuntia. Auringon säteilyteho vaihteli testin aikana, joka näkyy kuvaajassa huojuntana alassäätöjen välissä. Tästä johtuen myös säädettävä tehokapasiteetti vaihteli testin aikana. Testin suurin prosentuaalinen tehonmuutos oli 77 % ja pienin muutos oli 47 % nimellistehosta (36 kW, AC). Tehomuutoksen suuruudella ei löydetty ajan kanssa korrelaatiota, vaan invertteri pystyi toteuttamaan tehon laskun tai noston alle kuudessa sekunnissa tehon määrästä huolimatta.



Kuva 15. Testilaitoksen invertterin reagointi tehokäskyihin etäkäyttöjärjestelmästä nähtynä. Keskimääräinen vasteaika on 4,7 sekuntia. (SolarPlus Suomenoja testlab 2019)

Liitteen 1 tuloksia tulkittaessa on huomattava, että vasteaika sisältää inverterin reaktioajan lisäksi internetyhteydestä ja mittausepävarmuudesta johtuvan poikkeaman, sillä mittaus tehtiin manuaalisesti blue'Login selainpohjaisesta etäkäyttöjärjestelmästä. Aika mitattiin sekuntikellolla, sillä etäkäyttöjärjestelmään päivittyvän kuvaajan tai sieltä ladattun Excel-raportin mittatarkkuus on yksi minuutti. Tulokset ovat silti riittävän tarkat, sillä Fingridin nopein vaatimus vasteajalle on 2 minuuttia, pois lukien FCR-D, joka rajattiin jo aikaisemmin ulos tarkastelusta.

Ohjausvasteen kannalta Meteocontrol blue'Log X-series SCADA:lla ja Huawei SUN2000 36 KTL -invertterillä varusteltu kiinteistöasenteinen aurinkovoimala voi teknisesti osallistua reservi- ja säätösähkömarkkinoille. Ohjausvasteen kannalta mahdollisia markkinapaikkoja ovat

- taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)
- automaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR)
- säätösähkömarkkinat (mFRR).

Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) aktivoituu useita kertoja tunnissa paikallisen taajuusmittaukseen perustuen. Automaattisen ohjauksen täytyy reagoida ohjaukseen kolmen minuutin viiveellä. Minimikapasiteetti on 0,1 MW, ja korvaus säädetyistä kapasiteetista on 14 €/MW,h tuntimarkkinoilla ja kymmeniä euroja/MW,h vuosimarkkinoilla (2018). (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 6; Markkinapaikat 2019.)

Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR) aktivoituu Fingridin tehosihtaaln mukaisesti kahden minuutin viiveellä useita kertoja vuorokaudessa ja aktivoidaan tarjouskokojen suhteessa. Säätöä hankitaan vain osalle vuorokauden tunneista. Tarjouksilla voi osallistua vai ylös- tai alassäätöön 5 MW:n minimikapasiteetilla. Korvaus muodostuu kapasiteettikorvauksesta, joka on kymmeniä euroja/MW,h) ja säädettävästä energiasta säästösähkömarkkinahinnan mukaan (€/MWh). (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 9; Markkinapaikat 2019.)

Säätösähkömarkkinat (mFFR) aktivoituu säätötarjosten ja -tarpeen mukaan viidentoista minuutin viiveellä Fingridin signaalista. Minimikapasiteetti on elektronisella tilauksella 5 MW, ja korvaus perustuu säätösähkömarkkinahintaan. Erilliset ylös- ja allassäätötarjoukset tilataan puhelimitse tai elektronisesti sanomalla. Korvaus muodostuu tilatun energian ja kalleimman tunnin aikana käytetyn tarjouksen mukaan. Korvaustaso on aina parempi kuin spot-hinta, joskus jopa satoja tai tuhansia euroja. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018: 10–11; Markkinapaikat 2019.)

Tässä insinööriyössä ei syvennyttä kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan kysyntäjoukon taloudelliseen tarkasteluun. Voidaan kuitenkin sanoa, että mikäli aurinkoenergian tuotantomienetykset ovat suuremmat kuin kysyntäjoukosta saatu korvaus on, säätö ei ole taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi säädettävän aurinkovoimakapasiteetin määrittäminen on haasteellista varsinkin, jos säädöstä tehtävä tarjous on lähetettävä huomattavasti aikaisemmin kuin säädön toteutus. Haasteena on ennustaa säätökapasiteetin suuruus, sillä pilvisuus vaikuttaa suoraan säädettävän tehon suuruuteen. Mikäli paikalliset sääolosuhteet muuttuvat rajusti tarjouksen jättämisen jälkeen, luvattuun säätökapasiteettiin ei välttämättä päästä. Muuttuvien sääolosuhteiden vaikutusta säätökapasiteettiin voidaan kuitenkin välttää, mikäli aurinkovoimalaitoksia säädetään suurena kokonaisuutena, jotka ovat maantieteellisesti hajautettuja. Tällöin voi paikallisten sääolosuhteiden vaikutus säädettävän kapasiteetin määrään luultavasti tasoittuu. Tämä on kuitenkin vain oletus, eikä tätä ole tässä insinööriyössä tutkittu.

4 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin Fortumin kiinteistöasenteisten aurinkovoimalaitosten kykyä osallistua reservi- ja säätösähkömarkkinoille. Työssä selvitettiin, voidaanko Suomenojan testivoimalaitoksen tuotantoa etäohjata laitoksella olemassa olevilla komponenteilla tai muiden laitteiden avulla. Tavoitteena oli selvittää yhteensopivin ratkaisu ja toteuttaa sen pohjalta vasteaikakoe testilaitoksella, jotta voidaan selvittää, toimiiko kysyntäjousto min-käkin markkinapaikan kanssa.

Työssä selvisi, että testilaitoksen Huawei SUN2000 36 KTL -invertteriä on mahdollista etäohjata Meteocontrol blue'Log X-series SCADA:n avulla. Meteocontrol tarjoaa lisenssinvaraista palvelua nimeltä RPC (Remote Power Control), joka avaa avoimen rajapinnan SCADA:n ja internetin välille. Rajapinnan kautta voidaan lähettää komentoja Mod-Bus TCP-protokollalla SCADA:n kautta invertterille ja näin etäohjata aurinkovoimalaitoksen tuotantoa. Meteocontrol ei kuitenkaan tarjoa valmista järjestelmää, jolla automatisoinnin voisi toteuttaa. Mikäli RPC-rajapintaa hyödyntävän automatisoinnin haluaa toteuttaa, se täytyy luoda itse. Ohjauksen automatisointi vaatii ohjauslogiikan selvittämistä ja muuta ohjelmointityötä, johon insinööriyön resurssit eivät riittäneet. Sen sijaan vasteaikakoe toteutettiin manuaalisesti SCADA:n XC-päivityksen ja blue'Login etäkäyttöjärjestelmän avulla.

Huawei-invertteri reagoi keskimäärin 4,7 sekunnissa etäkäyttöjärjestelmästä lähetettävään tehonalennuskäskyyn. Koetta seurattiin etäkäyttöjärjestelmän kuvaajasta ja vasteaika mitattiin sekuntikellolla, sillä järjestelmän oma mittatarkkuus oli liian epätarkka. Mittaukset sisältävät inhimillisen mittausepävarmuuden sekä internetyhteydestä johtuvan viiveen. Tulokset ovat silti tarpeeksi tarkat, sillä vasteaika alittaa reilusti tarkasteltavien markkinapaikkojen nopeusvaatimukset.

Työssä selvisi, että Meteocontrol blue'Log X-series SCADA:lla ja Huawei SUN2000 36 KTL -invertterillä varusteltu aurinkovoimala voi vasteajan kannalta osallistua seuraaviin reservi- ja säätösähkömarkkinapaikkoihin

- taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N), max. 3 minuutin vasteaika
- automaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR), max. 2 minuutin vasteaika
- säätösähkömarkkinat (mFRR), max. 15 minuutin vasteaika.

Työssä ei syvennytty aurinkovoimalan kysyntäjoustopuun taloudellisen kannattavuuteen, mutta tarkastelussa selvisi, että markkinapaikoilla on erilaiset korvaukset ja ehdot. Taloudellista tarkastelua tehdessä on huomioitava, että kiinteistöasenteisen aurinkovoimalan tuotannon pudottamisesta on saatava suurempi korvaus kuin menetetyt aurinkoenergiatuotannon hyöty olisi sillä hetkellä ollut. Lisäksi tarjousten näkökulmasta haastavaa on säätökapasiteetin ennustaminen, sillä säteilyolosuhteiden muutokset vaikuttavat suoraan aurinkovoimalan tehoon ja täten säätökapasiteettiin. Monien aurinkovoimalaitosten kokoaminen suureksi kokonaisuudeksi voisi pienentää tätä ongelmaa mikäli voimalaitokset ovat maantieteellisesti hajautettuja. Tätä ei kuitenkaan tutkittu tässä työssä. Kehitysideana on selvittää taloudellinen kannattavuus esimerkiksi 5–10 MW:n aggregoidulle laitospuun kokonaisuudelle eri markkinapaikkoja silmällä pitäen. Myös säteilyolosuhteiden vaihtelun vaikutusta säätökapasiteettiin tulisi analysoida ja ohjauslogiikka tulisi selvittää ennen RPC-rajapintaa hyödyntävän automatisoinnin käyttöönottoa. Tämä vaatii tutkimus- ja kehitystyötä sekä yhteistyötä Fingridin ja Meteocontrolin kanssa.

Lähteet

Aurinkopaneelit. 2018. Suntekno Oy. Verkkoaineisto. <<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>> Luettu: 24.6.2019.

blue'Log XC. 2019. Meteocontrol GmbH. Verkkoaineisto. <<https://www.meteocontrol.com/en/scada-plant-control/products/bluelog-xc/>>. Luettu: 13.8.2019.

blue'Log X-Series (XM / XC). 2019. Meteocontrol GmbH. Verkkoaineisto. <<https://www.meteocontrol.com/en/photovoltaic-monitoring/products/bluelog-x-series-xm-xc/>>. Luettu: 20.8.2019.

Device connection plans. 2017. Meteocontrol GmbH. Verkkoaineisto. <https://www.meteocontrol.com/fileadmin/Daten/Dokumente/EN/1_Photovoltaik_Monitoring/1_Produnkte/blue_Log_X-Serie/blue_Log_X-Serie/blue_Log_EN/DDN_832052_APL_blueLog_en.pdf>. Luettu: 3.8.2019.

Energiaverotus. 2016. Verohallinto. Verkkoaineisto. <<https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotu/>>. Luettu: 20.8.2019.

Aurinkosähköjärjestelmä 2018. Yrityksen sisäinen dokumentti. Fortum SolarPlus.

Harsia, Pirkko & Honkapuro, Samuli. 2017. Kysyntäjousto edistää uusiutuvaa sähkön tuotantoa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Verkkoaineisto. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/152084/Harsia_Honkapuro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu: 24.6.2019.

Hyysalo, Sampsa ym. 2017. Uusia näkymiä energiamurroksen Suomeen: Murrosareenan tuottamia kunnianhimoisia energia- & ilmastotoimia vuosille 2018-2030. Verkkoaineisto. <<http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-loppuraportti.pdf>> Luettu: 25.6.2019.

Johdanto sähkömarkkinoihin. 2019. Fingrid Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/johdanto-sahkomarkkinoihin/>> Luettu: 28.7.2019.

Knoblauch, Tobias. 2019. Sales Manager. Meteocontrol GmbH. Haastattelu. 26.7.2019. Espoo

Lampila, Jouko. 2018. S-ryhmä tekee Pohjoismaiden suurimman aurinkosähkön kerta-hankinnan. Verkkoaineisto. <<https://www.energiatalous.fi/?p=2011>>. Luettu: 3.6.2019.

Manner, Pekka. 2019. Business Development Manager. Fortum Oyj. Haastattelu. 20.8.2019. Espoo

Markkinapaikat. 2019. Fingrid Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/markkinapaikat>>. Luettu: 6.8.2019.

Mitä on inertia? 2018. Fingrid Oyj. Verkkoaineisto. <<https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>> Luettu: 5.7.2019.

Operating manual. 2015. Meteocontrol GmbH. Verkkoaineisto. <https://www.meteocontrol.com/fileadmin/Daten/Dokumente/EN/1_Photovoltaik_Monitoring/1_Produnkte/blue_Log_X-Serie/blue_Log_X-Serie/blue_Log_EN/BA_blue_Log_X_Series_en.pdf>. Luettu: 4.8.2019.

Pahkala, Tatu & ym. 2018, Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä: Älyverkko-työryhmän loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriö. Verkkoaineisto. <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161148/TEM_33_2018.pdf>. Luettu: 5.7.2019.

Rakennamme strategiallamme puhtaampaa maailmaa. 2019. Fortum Oyj. Verkkoaineisto. <<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/rakennamme-strategiallamme-puhtaampaa-maailmaa>>. Luettu: 1.6.2019.

REMOTE POWER CONTROL (RPC) - DIRECT MARKETING. 2017. Meteocontrol GmbH. Verkkoaineisto. <https://www.meteocontrol.com/fileadmin/Daten/Dokumente/EN/2_SCADA_Parkregelung/3_Loesungen/2_Direktvermarktung/Direktvermarktung_EN/DB_Remote_Power_Control_en_20160729.pdf>. Luettu: 10.8.2019.

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 2018. Fingrid Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>>. Luettu: 6.8.2019.

SolarPlus Suomenoja testlab. 2019. Yrityksen sisäinen dokumentti. Fortum SolarPlus.

S-ryhmästä Suomen suurin aurinkosähkön tuottaja. 2018. Verkkoaineisto. <https://www.s-kanava.fi/web/s-ryhma/uutinen/s-ryhmasta-suomen-suurin-aurinkosahkon-tuottaja/4451599_384136>. Luettu: 3.6.2019.

Sähkömarkkinat. 2018. Fingrid Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.youtube.com/watch?v=yTZ80WlzAtw>>. Luettu: 6.8.2019.

Sähkön ylituotantotilanne mahdollinen 10.5.2018. 2018. Fingrid Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/sahkon-ylituotantotilanne-mahdollinen-10.5.2018/>>. Luettu: 6.8.2019.

Tenhunen, Lauri. 2019. Valiokunnan mietintö TaVM332018 vp - HE 200/2018 vp. Talousvaliokunta. Verkkoaineisto. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Mietinto/Sivut/TaVM_33+2018.aspx>. Luettu: 3.6.2019.

User manual. 2017. Huawei Technologies Co. Ltd. Verkkoaineisto. <https://www.huawei.com/minisite/solar/en-na/service/SUN2000-33KTL-36KTL-40KTL-US/User_Manual.pdf>. Luettu: 10.7.2019.

Ylijäämäsähkön myynti. 2016. Motiva Oy. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaama-sahkon_myynti>. Luettu: 5.7.2019.

Mittauspöytäkirja

