

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A1101 Diplomityö

Tommi Siponen

**KYSYNTÄJOUSTON HYÖDYNTÄMINEN OSANA ÄLYKÄSTÄ
SÄHKÖVERKKOA**

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

 TkT Jussi Saari

Ohjaaja: DI Seppo Vihinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tommi Siponen

Kysyntäjoustop hyödyntäminen osana älykästä sähköverkkoa

Diplomityö 2018

72 sivua, 26 kuvaa, 8 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen, TkT Jussi Saari

Ohjaaja: DI Seppo Vihinen

Hakusanat: kysyntäjousto, sähkömarkkinat, energianhallintajärjestelmä

Tämä diplomityö on tehty osana SEAM Groupin projektia, jossa tehdasalueen älykkään sähköverkkajärjestelmän osaksi luotiin palvelu kysyntäjoustop hyödyntämiselle valituissa tuotantolaitoksen komponenteissa.

Kysyntäjousto on sähkön kulutuksen siirtämistä sähköverkon taajuuden säilyttämiseksi tasapainossa. Työssä kuvattu järjestelmä liitetään automaattisen taajuudenhallintareservin piiriin, joka on Fingridin ylläpitämä automaattisesti aktivoituva pätötehoreservi.

Työssä muodostettiin tarvittavat laskelmat ensimmäisen joustokohteen ohjausarvojen luomista varten. Arvot luotiin pilvipalveluun, joka on yhteydessä kohteen automaatioon. Työssä esitetään myös ohje vastaavan joustokohteen konfigurointia varten.

Työssä kuvattu kysyntäjoustopjärjestelmän ensimmäinen vaihe sisältää joukon varastojen viilennyksessä käytettävistä kylmäkoneista. Kun kohteesta yksilöidään lisää kapasiteettia kysyntäjoustop piiriin, voidaan luotua järjestelmää ja dokumentaatiota hyödyntää lisätehoa integroitaessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Tommi Siponen

Utilising demand-side management in a smart grid system

Master's Thesis 2018

72 pages, 26 figures, 8 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Ph.D. (Tech.) Esa Vakkilainen, Ph.D. (Tech.) Jussi Saari

Supervisor: M.Sc (Tech.) Seppo Vihinen

Keywords: demand-side management, electricity markets, energy management system

This Master's Thesis was done as a part of SEAM Group project, in which a demand-side management system was created as a part of smart grid system of an industrial production plant. The management system was integrated to chosen components of the facility.

Demand-side management is performed by transferring electricity consumption in order to maintain the power balance of the grid. System described in this Thesis will be a part of the frequency controlled normal operation reserve, an automatically activated frequency containment reserve maintained by Fingrid.

In this Thesis, necessary calculations were made to form control signals for the demand-side management. Values were created within a cloud service that is connected to automation system on site. A guide for configuration of similar system is also presented.

The first stage of the demand-side management system described in this Thesis includes a number of coolers used for temperature control of the storage areas. As new capacity is identified it is possible to use the system and documentation to integrate this additional power.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö valmistui SEAM Groupille vuoden 2018 kesän ja syksyn aikana. Haluan kiittää yritystä mahdollisuudesta suorittaa diplomityö ajankohtaisesta aiheesta energia-alalla.

Yliopiston puolelta kiitokseni saavat työni tarkastajat professori Esa Vakkilainen ja tekniikan tohtori Jussi Saari. Kiitokseni työn ohjaamisesta menevät diplomi-insinööri Seppo Vihiselle. Kiitokset myös Jukka Jaatiselle tuesta projektin edistämässä ja uusien asioiden oppimisessa.

Tämän diplomityön myötä sain päätökseen reilun viiden vuoden taipaleeni Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Kiitos ystäväilleni ja opiskelijatovereilleni, joiden kanssa sain jakaa yliopisto-opiskelun raskaan taakan ja etsiä keinoja sen keventämiseen.

Lappeenrannassa 15.11.2018

Tommi Siponen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	7
2	ENERGIAMURROS	9
2.1	Älykäs sähköverkko	10
2.2	Hajautettu energiantuotanto	12
2.3	Aurinko- ja tuulivoima	15
2.4	Energian varastointi.....	18
3	SÄHKÖMARKKINAT	20
3.1	Day ahead- ja intraday-markkinat	22
3.2	Tasesähkö	23
3.3	Reaaliaikamarkkinat	24
3.3.1	Taajuusohjattu käyttöreservi	25
3.3.2	Taajuusohjattu häiriöreservi.....	26
3.3.3	Automaattinen taajuudenhallintareservi	26
3.3.4	Säätösähkömarkkinat	27
3.3.5	Nopea häiriöreservi	28
3.3.6	Säätökapasiteettimarkkinat	29
3.4	Kysyntäjousto	30
3.5	Sähkömarkkinoiden kehitys	33
4	ENERGIANHALLINTAJÄRJESTELMÄT	36
5	NURMON AURINKO	40
6	JÄRJESTELMÄKUVAUS	43
6.1	Laitteisto	43
6.1.1	PLC-yksikkö	44
6.1.2	CPO-yksikkö.....	46
6.1.3	Kytkenät	46
6.2	Pilvipalvelu.....	47
6.2.1	Yleiset ohjausmuuttujat.....	48
6.2.2	Kohdespesifit ohjausmuuttujat.....	55
7	OHJE FCR-N -KOHTEN OHJAUKSEN KONFIGUROINTIIN	58
8	JATKOKEHITYS	69
9	YHTEENVETO	71
	LÄHTEET	73

Liite 1. Kysyntäjouston markkinapaikkojen perustiedot

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

f	Taajuus [Hz]
P	Teho [MW]

Lyhenteet

aFRR	Automaattinen taajuudenhallintareservi (<i>Automatic Frequency Restoration Reserve</i>)
AMR	Etäluettava energiamittari (<i>Automatic Meter Reading</i>)
CHP	Lämmön ja sähkön yhteistuotanto (<i>Combined Heat and Power</i>)
EMS	Energianhallintajärjestelmä (<i>Energy Management System</i>)
FCR	Taajuuden vakautusreservi (<i>Frequency Containment Reserve</i>)
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi (<i>Frequency Controlled Disturbance Reserve</i>)
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi (<i>Frequency Controlled Normal Operation Reserve</i>)
FRR	Taajuuden palautusreservi (<i>Frequency Restoration Reserve</i>)
IoT	Teollinen internet (<i>Internet of Things</i>)
mFRR	Säätösähkömarkkinat/säätökapasiteettimarkkinat (<i>Manual Frequency Restoration Reserve</i>)
PLC	Ohjelmoitava logiikka (<i>Programmable Logic Controller</i>)
PV	Aurinkosähkö (<i>Photovoltaics</i>)
RR	Korvaava reservi (<i>Replacement Reserve</i>)

1 JOHDANTO

Maailman energiajärjestelmä on muuttumassa nopeasti. Erityisesti ilmastonmuutoksen torjumiseksi ovat sekä tuotantomuodot, että kulutus kehittyneet entistä puhtaampaan suuntaan. Uusiutuvien energiamuotojen yleistyessä myös kulutuksen on reagoitava uudenlaiseen energiajärjestelmään. Tästä seuraa tarve kysynnän jouston yleistymiselle sekä entistä paremmalle tiedon käsittelylle ja ohjaukselle energiasektorin piirissä. Samanaikainen tekniikan kehitys esimerkiksi esineiden internetin ja älykkäiden sähköverkkojen osalta on mahdollistamassa ja edistämässä tätä muutosta

Tässä työssä kuvataan uusiutuvan energiantuotannon yhteyteen liitettävän kysyntäjoustojärjestelmän muodostaminen nykyaikaisella energianhallintasovelluksella. Jatkossa tehtyjä ratkaisuja voidaan hyödyntää järjestelmän laajentamisessa koskemaan yhä suurempaa osaa kohteen joustopotentialista.

Työssä selostetaan kohteena olevan älykkään sähköverkon kysyntäjouston ohjauksen ensimmäinen vaihe, jossa kysyntäjouston piiriin kytketään osa Atrian tehtaiden kylmävaraston jäähdytystehosta. Laitteiden säätöpotentiaali kaupataan Fingridin ylläpitämällä automaattisen taajuudenhallintareservin markkinapaikalla. Tehon ohjauksen määrittely tapahtuu tämän diplomityön tilaajan SEAM Groupin pilvipalvelussa, jonne tarvittavat laskennat ja määrittelyt tehdään.

Osana työtä muodostetaan ohje automaattisen taajuudenhallintareservin käyttöön kytkettävän kohteen konfiguroinnista pilvipalveluun. Kun kohteesta yksilöidään lisää kapasiteettia jouston piiriin, tätä dokumentaatiota voidaan hyödyntää integroitaessa lisätehoa järjestelmään.

Työn aluksi kerrotaan energiamurroksesta eli siitä, mitä energian tuotannon ja kulutuksen muutoksia tällä hetkellä tapahtuu ja millaista kehitystä niiden suhteen on odotettavissa tulevaisuudessa. Tämän kehityksen osa on myös kysyntäjouston tarpeen kasvaminen. Kysyntäjoustoa ja siihen liittyviä sähkömarkkinatekijöitä on käsitelty tarkemmin omassa luvussaan.

Työssä käsitellään myös energianhallintajärjestelmiä ja niiden toiminnallisuuksia sekä kehitystä. Teknologian sekä energiajärjestelmien kehittyessä myös näiden ohjelmistojen on kehitettävä vastatakseen energiasektorin uusiin tarpeisiin.

Työn loppuosassa kuvataan, millä periaatteilla säädettävä laitteiston ohjaus tapahtuu. Tähän liittyy sekä tiedonsiirtolaitteistojen keskeinen toiminta, että sähköverkon taajuuteen perustuva säätötilanteiden määrittely ja ohjaussignaalien laskenta. Työssä ei oteta kantaa automaation toimintaan ohjaussignaalien käsittelyn osalta muuten kuin yleisellä tasolla. Vastaavasti ohjaussignaalien tarkempaa tiedonsiirtoprotokollaa ja sen ohjelmointia ei ole tässä työssä kuvattu.

Järjestelmäkuvauksen jälkeen annetaan ohje uuden kysyntäjoustokohteen konfiguroinnille. Ohjeessa kuvataan tarvittavien muuttujien ja määritysten luomisen vaiheet ja niitä varten tehtävät toimenpiteet.

Työn on tehty SEAM Groupin (virallinen nimi Sustainable Energy Asset Management Oy) toimeksiannosta. SEAM Group on yritys, joka on erikoistunut toimittamaan ohjelmistoja älykkääseen sähkönkulutukseen kysyntäjoustoa hyödyntämällä. Palvelut kohdistetaan pääasiassa keskikokoisille tai suurille sähkönkäyttäjille.

SEAM Group on Synchron Tech Oy:n osakkuusyhtiö. Synchron Tech on ohjelmistoyritys, joka suunnittelee ja toteuttaa tuotannonhallinnan ratkaisuja prosessi- ja valmistavan teollisuuden käyttöön. SEAM Groupin palvelut perustuvat Synchron Techn SyncPower-tuotteeseen, joka on energiatoimialan raportointiin, valvontaan ja optimointiin tehty ohjelmisto.

2 ENERGIAMURROS

Maailman energiajärjestelmä on suurimman muutoksen kohteena moniin vuosikymmeniin. Kehityssuunta on perinteisen fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuvan keskitetyn tuotannon sijaan kääntymässä kohti hajautettua, suurenevissa määrin uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa tuotantoa. Tämän lisäksi paljon odotuksia on energian käytön tehostamispyrkimyksillä, sekä sähköjärjestelmien ”älyllistämällä”. Näistä jälkimmäisellä tarkoitetaan sitä, että verkossa olevat laitteet ja järjestelmät jakavat tietoa ja mahdollistavat näin sähkön järkevän tuotannon ja käytön monista eri osista koostuvissa kokonaisuuksissa.

Maailman energiantuotanto on perinteisesti keskittynyt suuriin tuotantoyksiköihin. Kansainvälisesti sähköä tuotetaan pääasiassa fossiililla polttoaineilla ja ydinvoimalla. Voimalaitoksissa energialähteellä tuotetaan lämmön avulla höyryä, joka muutetaan liike-energiaksi turbiineissa ja lopulta sähköksi generaattorissa. Tämän lisäksi vesivoimalla voidaan tuottaa suoraan liike-energian kautta sähköä. Tuotettu sähkö siirretään siirtoverkon kautta asutuskeskuksiin ja jakeluverkon kautta loppukäyttäjille. (Mak, 2015)

Energiajärjestelmien kehitykseen vaikuttaa merkittävästi tavoite ilmakehässä olevien päästöjen vähentämiseksi. Tällä pyritään ehkäisemään ilmastonmuutosta, mutta myös parantamaan hengitysilman laatua. Esimerkiksi Euroopan Unioni on sopinut niin kutsutussa 20-20-20 -tavoitteessaan vähentävänsä kasvihuonekaasupäästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta. Samassa päätöksessä se sitoutuu nostamaan uusiutuvien energiantuotantomuotojen osuuden 20 %:iin kokonaistuotannosta ja lisäksi tehostamaan energiatehokkuutta 20 %. (Euroopan komissio, 2018)

Lisäksi päästövähennyksistä on sovittu maailmanlaajuisesti muilla sopimuksilla. Näistä suurin viimeaikoina tehty sopimus on Pariisin ilmasopimus vuodelta 2015. Sopimuksen mukaan osapuolet sitoutuvat toimillaan pitämään globaalin lämpenemisen alle kahdessa asteessa esiteolliseen aikaan verrattuna ja mahdollisuuksien mukaan pyrkivät alle 1,5 asteen lämpenemiseen. Pariisin sopimus ei kuitenkaan sisällä velvoitteita päästövähennyksistä tai muistakaan toimenpiteistä. (Ympäristöministeriö, 2017) Ilman velvoitteita ei sopimuksella käytännössä ole suoraa vaikutusta ilmaston lämpenemiseen

tai päästömääriin, vaan toimenpiteiden suorittaminen on kansallisten tai muiden päätösten varassa.

Yksi selkeä tekijä uusiutuvan energiantuotannon lisääntymisessä viime vuosina on tuuli- ja aurinkovoiman yleistyminen energiantuotantomuotoina ympäri maailman. Näiden tuotantotapojen etuna on käytännössä päästötön energiantuotanto. Huono puoli on sääolosuhteista riippuvaisen tuotannon vaihtelevuus. Tuotantohetkeä tai -tehoa ei voida valita vaan tuotanto tapahtuu ihmisestä riippumattomina aikoina ja joskus ennalta arvaamattomasti. Tämä hankaloittaa erityisesti sähköntuotannon riittävyttä silloin kun tarve on suuri, mutta tuotanto vastaavasti vähäinen.

Tuotannon ajalliseen joustamattomuuteen on erilaisia ratkaisuja. Näistä mainittakoon erityisesti kulutuksen joustavuus sekä sähkön varastointi. Näitä ratkaisuja sekä muita energiamurrokseen vaikuttavia tekijöitä on tarkasteltu tässä luvussa.

2.1 Älykäs sähköverkko

Älykäs sähköverkko (*smart grid*) on nimitys järjestelmälle, johon voi kuulua sähkönsiirron lisäksi esimerkiksi etäluettavia, kahdensuuntaiseen tiedonsiirtoon kykeneviä sähkömittareita, älykkäitä sähkölaitteita, uusiutuvan energian tuotantoa sekä erilaisia IT- ja automaatiojärjestelmiä. Termille ei ole yhtä yksiselitteistä määritelmää, mutta sitä käytetään kuvaamaan erilaisista kokonaisuuksista, joihin kuuluu edellä mainittuja tekijöitä. Älykästä sähköverkkoa havainnollistaa kuva 1.

Älykäs, etäluettava sähkömittari on yksi älykkään sähköverkon mahdollistajista. Olennaista on sähkömittarin datan kulkeminen kahteen suuntaan, jolloin tieto on saatavissa niin käyttäjällä kuin sähköverkkoyhtiölläkin. Tämä mahdollistaa tiedon hyödyntämisen sähkönkulutuksen joustavoittamiseksi. (Bayindir et al. 2016)

Älykkään sähkömittarin avulla sähkön käyttäjän kulutus todennetaan etänä ja myös tuntihintaan perustuva laskutus on mahdollinen. Aikaan perustuva hinnoittelu on myös edellytys sähkön kuluttajan mahdollisuudelle säätää kulutustaan hinnan ja siten käytännössä verkon kapasiteetin mukaan. Suomessa älykkäät sähkömittarit ovat yleisessä käytössä lähes kaikilla asiakkailta (Järventausta et al. 2015).

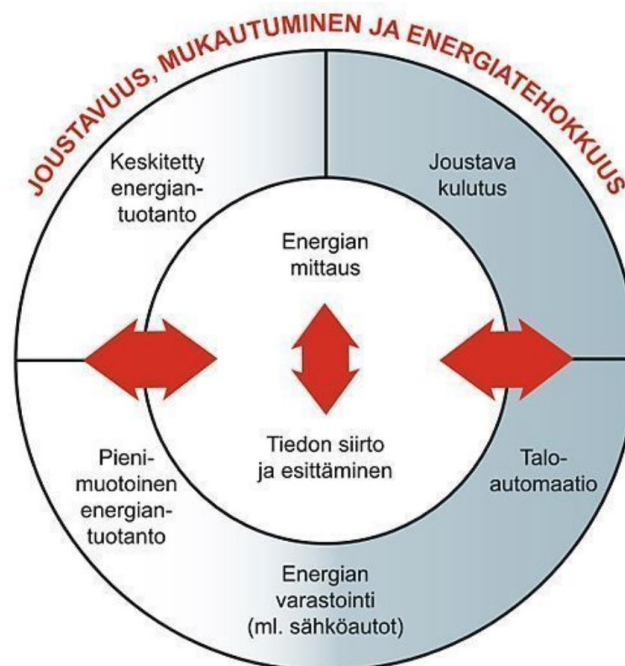
Mikäli myös kuluttajalla olisi käytössään älysäähkömittarin reaaliaikainen data, edistäisi se mahdollisuutta hallinnoida omaa sähkökäyttöään paremmin. Esimerkiksi verkosta tapahtuva kulutuksen seuranta riittävän tiheällä aikaresoluutiolla mahdollistaisi kuluttajan oman sähkökulutuksen seuraamisen muutenkin kuin jälkikäteen. Pahkala et al. (2018) toteavatkin työ- ja elinkeinoministeriön työryhmän raportissaan seuraavan sukupolven älysäähkömittarin olevan jatkossa olennainen osa sähkömarkkinoiden joustavuutta ja että kuluttajan saaman tiedon tulee olla kattavaa ja mittaustiheydeltään riittävää, jotta se tukisi sähkömarkkinoiden transformaatiota yhä reaaliaikaisemmaksi.

Loppukäyttäjän kulutuksen jousto voidaan myös automatisoida. Tästä voi olla esimerkkinä tuotantolaitoksen tiettyjen komponenttien automaattinen reagointi hintasignaalin mukaan tai vaikkapa pienkuluttajan keskenään kommunikoivat kodinkoneet. Kysyntäjousto on selitetty tarkemmin luvussa 3.4.

Yleinen tekijä älykkäässä sähköverkossa on myös se, että sähkö voi siirtyä kaksisuuntaisesti. Perinteisessä yksisuuntaisessa verkossa sähkö siirtyy keskitetyistä voimalaitoksista loppukäyttäjälle. Erilaisen pien- ja hajautetun tuotannon lisääntyessä tarvetta on kuitenkin myös sähkösiirtämiseen pientuottajalta omaan käyttöön sekä verkkoon.

Tulevaisuudessa mahdollisia ovat myös tilanteet, joissa pientuottajat muodostavat saarekkeen, jossa ne voivat siirtää ja myydä sähköä toisilleen. Saareke voi välillä olla yhteydessä ulkoiseen sähköverkkoon ja toisinaan erillään siitä, tarpeen mukaan. Tällaista saareketta kutsutaan mikroverkoksi. (Vihanninjoki, 2015)

Energian varastointimahdollisuudella on olennainen merkitys älykkäiden sähköverkkojen kehityksessä. Varastointi parantaa mahdollisuutta tuotannon ja kulutuksen ajalliseen säätöön. Varastoon voidaan ladata sähköä silloin, kun sään mukaan tapahtuva tuotanto sitä tarjoaa eikä kulutusta tapahdu yhtä paljon. Tämä lataus voidaan purkaa korkean kulutuksen ja matalan tuotannon hetkellä. Varastoinnilla voidaan myös reagoida hintasignaaliin ja käyttää ostosähköä silloin, kun se on halpaa ja varastoida omaa tuotantoa käytettäväksi kalliimman hintatason aikana. Luonnollisesti tämä vakauttaa myös koko sähköjärjestelmään, sillä hintasignaali seuraa yleensä tuotannon ja kulutuksen suhdetta. (Halme et al. 2015)



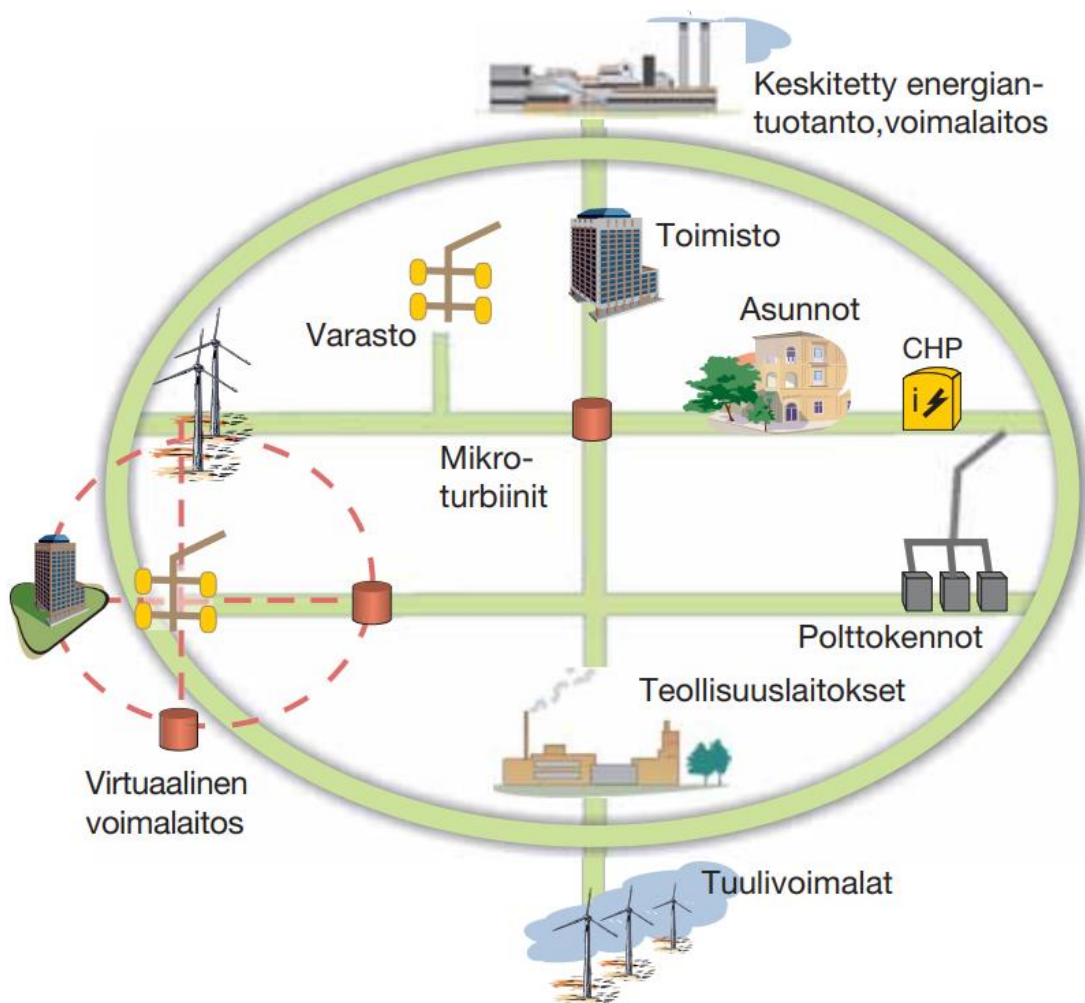
Kuva 1 Yksi esimerkki älykkään sähköverkon toimintaperiaatteesta. Punaiset nuolet kuvastavat sekä energian- että tiedonsiirron kaksisuuntaisuutta. (Motiva, 2017)

Älykkään sähkönkäytön ratkaisut kehittyvät jatkuvasti. Älykkäät sähköverkot vaativat toimiakseen kehittynyttä tiedonsiirtoa ja muuta informaatioteknologiaa. Digitalisaatio on myös osa energiateknologian kehitystä ja edistää älykkäiden sähköverkkojen toimintaa. Tiedonsiirron kehitykseen liittyy myös esineiden internet (IoT). Digitalisaatiota ja IoT:ta on käsitelty lisää luvussa 4.

2.2 Hajautettu energiantuotanto

Hajautettu energiantuotanto on käsitteenä laaja-alainen ja se voidaan määritellä eri tavoin. Yleisesti hajautetussa energiantuotannossa tuotantoyksikön koko on perinteistä järjestelmää pienempi. Tällöin hajautettu tuotanto sivuaa käsitteenä vahvasti pientuotantoa. Vastaavasti tuotantoyksiköitä on enemmän ja tuotanto voi tapahtua entistä lähempänä loppukäyttäjää. Tämä merkitsee myös sitä, että hajautettu tuotanto voi hyödyntää paikallista alkuperää olevia energialähteitä. Näitä ovat esimerkiksi läheltä tuotu biomassa, muu biopolttoaine tai yleisesti saatavilla olevat tuuli- ja aurinkoenergia. (Vihanninjoki, 2015)

Koska kehittyvän energiajärjestelmän päämääränä on ilmastollinen kestävyys sekä ympäristölähtöisyys, painottuu hajautettu tuotanto luonnollisesti uusiutuvaan energiaan. Joissain yhteyksissä hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan lähtökohtaisesti uusiutuvaan energiaan perustuvaa pientuotantoa. Sitä se ei määritelmällisesti kuitenkaan aina ole, vaan hajautettu tuotanto voi periaatteessa hyödyntää myös muita energiaraaka-aineita. Periaatekuva hajautetusta energiajärjestelmästä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Hajautetun energian järjestelmä. (Muokattu lähteestä VTT, 2009)

Hajautetun tuotannon lähtökohtana voi myös olla se, että energiaa tuotetaan oletusarvoisesti omaan eli tuottajan käyttöön. Tämä tuotanto voi toimia verkosta ostettavan sähkön lisänä. Esimerkki tästä on rakennuksiin asennettavat aurinkopaneelit, joiden teho käytetään saman kohteen sähkönkulutuksen osana. (Vihanninjoki, 2015) Tuotetun sähkön omakäyttö on myös taloudellisesti järkevää, sillä tällöin säästetään paitsi

kulutetun sähkön hinta veroineen myös välttään siirtokustannuksilta käytetyn sähkön osalta. Vastaavasti myydessä sähköä hyötyä saadaan ainoastaan sähkön myyntihinnan verran.

Huomioitavaa on, että ilmastoystävällisyyden näkökulmasta tarkasteltuna hajautettu tuotanto ei aina ole keskitettyä tuotantoa yksiselitteisesti parempi vaihtoehto. Polttovoimalaitoksissa suurten energiantuotantoyksiköiden toiminta on lähtökohtaisesti vastaavia pieniä laitoksia energiatehokkaampaa ja kustannuksiltaan edullisempaa. Tähän vaikuttavat hyväksi koetut ja runsaasti tutkitut teknologiat, kuten myös kokemus niiden käytöstä ja optimoinnista. Myös tehokkaammat puhdistusjärjestelmät sekä tarkka sääntely ja valvonta vähentävät suurten laitosten ilmansaastepäästöjä. (Vihanninjoki, 2015)

Hajautetun tuotannon kehityksen kannalta olennaista on automaation ja informaatiotekniikan toimivuus. Näillä varmistetaan sekä järjestelmän toimivuus paikallisesti, että integroituminen laajempaan energiajärjestelmään. Toimivaan hallintajärjestelmään liittyy energian tuotanto, siirto, jakelu, varastointi ja käyttö. Laaja hajautettu tuotanto liittyy siis olennaisesti älykkääseen sähköjärjestelmään, joka puolestaan vaatii toimiakseen tarpeelliset automaatio- ja IT-ratkaisut. (Vihanninjoki, 2015)

Useita pieniä energian tuotanto- ja kulutusyksiköitä voidaan yhdistää niin kutsutuksi virtuaaliseksi voimalaitokseksi. Tällä tarkoitetaan useiden kohteiden hallinnointia keskitetysti niin, että niistä muun sähköverkon silmissä muodostuu käytännössä yksi laitos. Yksittäisten energiavirtojen kokoaminen suuremmaksi kokonaisuudeksi vähentää toiminnan vaihteluiden ennustamisvaikeutta sekä parantaa kustannustehokkuutta. Virtuaalinen voimalaitos voi pitää sisällään sekä tuotantoa, kulutusta että varastointia. Myös virtuaalilaitoksessa olennaista on tehokas tiedonsiirto, jotta ohjaavalla järjestelmällä on jokaisesta laitoksen osasta reaaliaikainen tilatieto. (Kasaei et al. 2017)

Älykäs, kaksisuuntaiseen tietoliikenteeseen kykenevä energiamittari on hajautettuun tuotantoon liittyvien järjestelmien keskeinen osa. Sen välittämän datan avulla mahdollistuu järjestelmän aktiivinen hallinta esimerkiksi sähkömarkkinoiden ja kuormanohjauksen suhteen. (Vihanninjoki, 2015)

Tämän työn kohteena oleva älykäs järjestelmä ei kenties määritelmältään vastaa esimerkiksi pientuotantoa, sillä sisältyyhän siihen valmistuessaan Suomen suurin aurinkosähkövoimalaitos. Toisaalta sen tuottama sähkö tehdään päästöttömällä aurinkoenergialla ja kulutetaan oletusarvoisesti samassa kohteessa. Siihen liittyy myös kehittynyt IT- ja automaattiosysteemi, joka mahdollistaa älykkään sähkönkulutuksen. Näin ollen se vastaa hajautetun tuotannon ja älykkään sähköverkon tavoitteita ja edistää niitä.

2.3 Aurinko- ja tuulivoima

Auringon säteilyä voidaan jalostaa sähkö- tai lämpöenergiaksi. Tyypilliset aurinkoenergian hyödyntämiseen käytettävät tekniikat ovat aurinkokenno ja aurinkokeräin. Myös muita teknologioita aurinkoenergian hyödyntämiseen on käytössä eri puolilla maailmaa.

Aurinkoenergian voi hyödyntää suoraan lämpönä aurinkokeräimellä. Aurinkokeräimellä auringon säteily absorboituu väliaineeseen, joka kuumenee. Väliaineella voidaan lämmittää lämmönvaihtimen avulla esimerkiksi lämminvesivaraajan käyttövettä.

Tässä luvussa keskitytään aurinkoenergian suhteen sen hyödyntämiseen sähköntuotannossa ja nimenomaan suoraan sähköntuotantoon aurinkokennojen avulla. Aurinkokennolla auringon säteilyä muutetaan sähköksi absorboimalla sitä puolijohteeseen valosähköistä ilmiötä hyödyntäen. Sähköntuotantoon aurinkoenergian avulla on olemassa myös muita vähemmän käytettyjä tekniikoita.

Kansainvälisen uusiutuvan energian järjestön IRENA:n (2018) tilastojen mukaan maailmassa oli asennettua PV-kapasiteettia vuoden 2017 lopulla yli 385 GW. Suurin yksittäinen maa aurinkosähkön osalta on Kiina, jossa kapasiteettia on yli 130 GW. Euroopan osuus on 109 GW. Suomen osuus tästä oli Energiaviraston (2018) mukaan noin 70 MW.

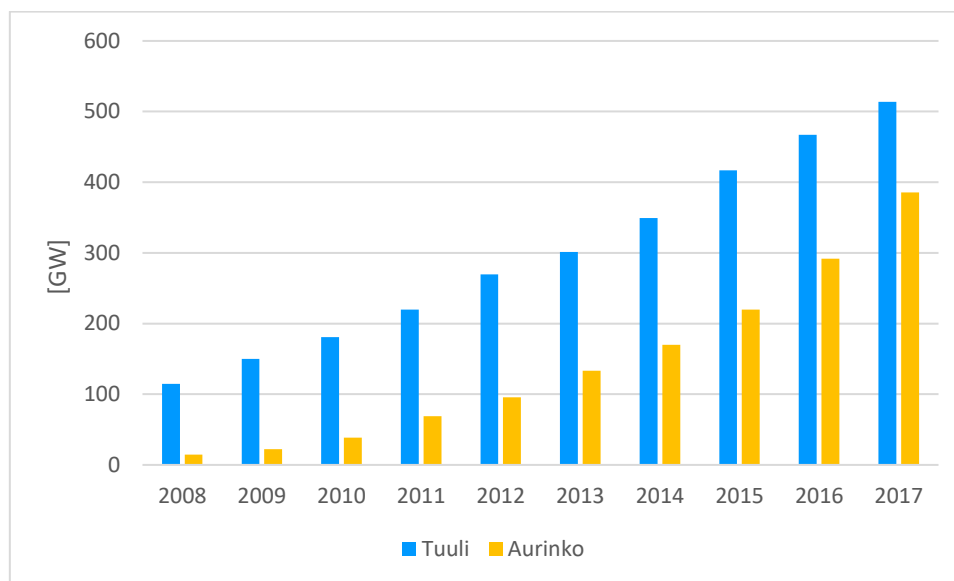
Aurinkosähkö on nopeasti kasvava uusiutuvan energian muoto suhteellisella kasvulla mitattuna. Vuonna 2016 globaali kapasiteetti oli noin 291 GW, johon on vuoden aikana tullut lisäystä noin 33 prosenttia. Suomessa aurinkosähkön tuotanto samalla ajanjaksolla

kasvoi tilastojen perusteella 2,5-kertaiseksi, mutta absoluuttinen asennetun kapasiteetin määrä on toistaiseksi melko pieni.

Aurinkosähkön taloudellista kilpailukykyä on rajoittanut aurinkopaneelien korkea hinta. Mitä kalliimmaksi investointi muodostuu, sen korkeampi on tuotantokustannus energiayksikköä kohden. Aurinkoenergialle tyypilliseen tapaan itse tuotannosta ei käytännössä aiheudu muuttuvia kustannuksia. Uusiutuvia energiantuotantomuotoja on monin paikoin tuotettu poliittisilla päätöksillä. Esimerkiksi syöttötariffeilla on avustettu uusien tuotantoteknologioiden kilpailukyvyn kehittymistä (Halme et al. 2015). Tosin Suomessa aurinkoenergialle ei ole maksettu syöttötariffia, kuten on tehty esimerkiksi tuulivoimalle. (Motiva, 2018)

Historiallisesti aurinkosähköjärjestelmissä hintakehitys on kustannustehokkuuden paranemisen myötä noudattanut tasaisesti laskevaa kehityssuuntaa. On havaittu, että jo pitkän aikaa kapasiteetin tuplaantuessa on järjestelmien hinta laskenut 20 prosenttia. (Halme et al. 2015)

Aurinkosähkön lisäksi nopeasti yleistynyt energiantuotantomuoto on tuulivoima. Globaali asennetun tuulivoiman kapasiteetti vuonna 2017 oli lähes 514 GW. Euroopassa kapasiteetti oli noin 171 GW ja Suomessa hieman vajaa 2 GW. Suomessa kasvua on edelliseen vuoteen nähden noin 27 %, mikä on suhteellisesti suurempi kuin maailman tuulivoiman kapasiteetin kokonaiskasvu, joka oli 10 %. Myös Euroopassa on toteutunut sama kasvunopeus kuin maailmassa keskimäärin. Tuuli- ja aurinkosähkökapasiteetin globaalia kehitystä IRENA:n dataan perustuen on havainnollistettu kuvassa 3. (IRENA, 2018)



Kuva 3 Tuuli- ja aurinkosähkön tuotantokapasiteetti maailmassa 2008-2017 (IRENA, 2018)

Suhteellisen nopeasta kasvusta huolimatta tuulivoiman osuus sekä Suomen tuotantokapasiteetista, että tuotetusta sähköstä on verrattain pieni, varsinkin verrattuna useisiin muihin kehittyneisiin maihin. Myös pinta-alaan suhteutettuna Suomessa on kohtuullisen pieni määrä asennettua tuulivoimakapasiteettia. Tähän vaikuttanee kuitenkin Suomen harva asukastiheys.

Tuulivoima ei aurinkosähkön tavoin tuota lainkaan suoria kasvihuonekaasupäästöjä, joskin tuotannon perustamisesta aiheutuu aina jonkin verran ympäristörasitetta. Kun lisäksi otetaan huomioon oletettu sähkön kysynnän kasvu, voidaan varmuudella nähdä molempien energiantuotantomuotojen yleistyvän jatkossakin, huolimatta jo toteutuneesta kasvusta. Samalla näiden tuotantomuotojen taloudellinen kilpailukyky paranee teknologian yleistyessä sekä mahdollisten uusiutuvia energiantuotantomuotoja tukevien poliittisten päätösten seurauksena.

Sekä tuuli- että aurinkoenergian tuotanto on riippuvaista sääilmiöistä ja näin ollen niitä voidaan kyllä ennustaa, mutta ei hallita. Kun joustamattomien tuotantomuotojen tuottama energiamäärä kasvaa, lisääntyvät myös haasteet tehotasapainon ylläpitämisessä. Jossain määrin vuodenaikojen mukaista tasoitusta saadaan sillä, että Suomen olosuhteissa aurinkosähköä tuotetaan suurilta osin kesäaikana, kun taas tuulivoimatuotanto on tasaisemmin jakautunut ja suurin osa tuotannosta tapahtuu talvikuukausina (Suomen tuulivoimayhdistys, 2018).

Tehotasapainon säilyttämistä voidaan edistää esimerkiksi energian varastoinnilla, mikä tasoittaa tuotannon vaihtelua ja hallitsemattomuutta. Myös kysyntäpuolen joustolla voidaan vaikuttaa verkon taajuuden hallintaan reagoimalla tuotannon muutoksiin.

2.4 Energian varastointi

Sähköjärjestelmän joustotarpeen lisääntyessä kasvaa myös tarve sähkön sekä ylipäänsä energian varastoinnille. Keinoja energian varastointiin on useita. Erilaisia energianvarastointitapoja ovat esimerkiksi sähköakut, lämpö- ja kylmäakut, pumppuvoimalaitokset, synteettinen metaani, vauhtipyörät ja superkondensaattorit. Käytännössä energiavarastojen kilpailukyky on vielä heikko. (Halme et al. 2015)

Varastoinnin tarpeisiin nähden energian varastointi on minimaalista. Suurin syy tähän on nimenomaan heikko taloudellinen käytettävyys. Energian varastointi ja käyttäminen myöhemmin uudestaan aiheuttaa luonnollisesti taloudellisen kustannuksen, jota voidaan verrata säilytetyn energian määrään. Kuluja voi tulla sekä laitteistoon ja sen käyttöön liittyvistä kustannuksista, että energian menetyksestä varastoinnin yhteydessä. Nykyisellään nämä kustannukset ovat suhteellisen korkeat ja näin ollen varastoinnin hyödyntämismahdollisuudet rajalliset. (Halme et al. 2015, Suokko & Partanen, 2017)

Mikäli akkuteknologian oppimiskäyrä noudattaisi aurinkosähköjärjestelmien vastaavaa, voisi varastointikustannus pienentyä nykyisestä noin 10 sentistä per ladattu ja purettu kilowattitunti noin 1 – 2 senttiin. Se, millä aikataululla tämä todellisuudessa tapahtuu ja miten akkujärjestelmien liiketoiminta kehittyisi, on vielä epävarmaa. (Halme et al. 2015)

Lämmön varastoinnissa voidaan käyttää lämpöakkuja, joissa lämpöenergia on sitoutuneena johonkin väliaineeseen. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa tasaamaan kulutuksen huipputunteja. Väliaineeseen varastoidaan lämpöä silloin kun sitä jää yli ja lämpöakku puretaan suuremman kysynnän aikana.

Sähköä varastoidaan tyypillisesti sähköakuilla. Sähkön varastoinnista saatava hyöty perustuu siihen, että sillä voidaan kulutuksen joustavuuden tapaan vaikuttaa sähkönkäyttöön eri ajanhetkinä. Sen lisäksi, että kulutusta pyritään pienentämään kalliin

sähkön aikaan, voidaan sitä tukea akusta purettavalla sähköllä. Olettaen, että akku on ladattu silloin kun sähkö on halpaa, syntyy säästöjä sähkön hinnan erotuksen mukaisesti.

Sähkön hinnassa säästämisen lisäksi voidaan varastoimalla optimoida sähkön kulutusta sähköverkon taajuuden näkökulmasta. Sähkövarasto on reservi, joka voidaan ottaa käyttöön kun kulutusta ei haluta laskea, mutta tuotanto on vajaata. Tosin mikäli sähkön hinta noudattaa tuotannon ja kulutuksen korrelaatiota, tapahtuu samantapainen säätö joka tapauksessa hintasignaalin perusteella toimittaessa.

Sähkön varastoinnin tulevaisuuden suhteen on pohdittu esimerkiksi sähköautojen potentiaalia. Mikäli sähköautot yleistyvät suunnitellulla tavalla, muodostuu niiden sisältämistä akuista kohtalainen sähkövarasto. Tämän energian hyödyntäminen joustavasti esimerkiksi lataus- ja purkuaikoja optimoimalla hyödyttäisi sähköjärjestelmää sekä myös kuluttajaa. Toisaalta yleistyessään kyseiset autot muodostava jo itsessään merkittävän sähköntarpeen. Tästä näkökulmasta niiden sähkönkäytön tehokkuus on myös edellytys eikä ainoastaan optio.

3 SÄHKÖMARKKINAT

Tässä luvussa kuvataan kysyntäjoustop näkökulmasta Suomen sähkömarkkinoiden eri markkinapaikkojen toimintaperiaatteet. Lisäksi kerrotaan kysyntäjoustop toiminnasta ja mahdollisuuksista. Lopuksi käsitellään sähkömarkkinoiden tämän hetkistä kehitystä ja lähitulevaisuudessa trendejä.

Pohjoismaisen sähkömarkkinan hinnoittelussa noudatetaan aluehinnoitteluperiaatetta. Tämä tarkoittaa sitä, että markkina-alue on jaettu pienempiin lohkoihin. Jako tehdään, koska siirtokapasiteetissa koko markkina-alueen sisällä on rajoituksia eikä samaa systeemihintaa voida toteuttaa kaikille alueille. (Partanen et al. 2016)

Siirtokapasiteetin sekä alueellisen kulutuksen ja tuotannon perusteella jokaisella hinta-alueella voi olla erillinen hinta. Aluehintaa ei kuitenkaan voi vaihdella yksittäisen alueen sisällä vaan kunkin tunnin aikana hinta on sama kyseisellä alueella. Alueiden rajat on esitetty kuvassa 4 ja ne on asetettu noudattamaan mahdollisuuksien mukaan valtioiden rajoja. Pohjoismaisen sähkömarkkinan tapauksessa Suomi, Viro, Latvia ja Liettua muodostavat kukin oman hinta-alueensa. Norja sekä Ruotsi ovat jakautuneet useaksi hinta-alueeksi ja Tanska vastaavasti kahdeksi hinta-alueeksi. (Partanen et al. 2016)



Kuva 4 Pohjoismaisen sähkömarkkinan hinta-alueet. Kuvasta nähdään aluehinnat [€/MWh] sekä alueiden välisten siirtojen määrät [MW] 27.6.2018 klo 15:00 (Statnett, 2018)

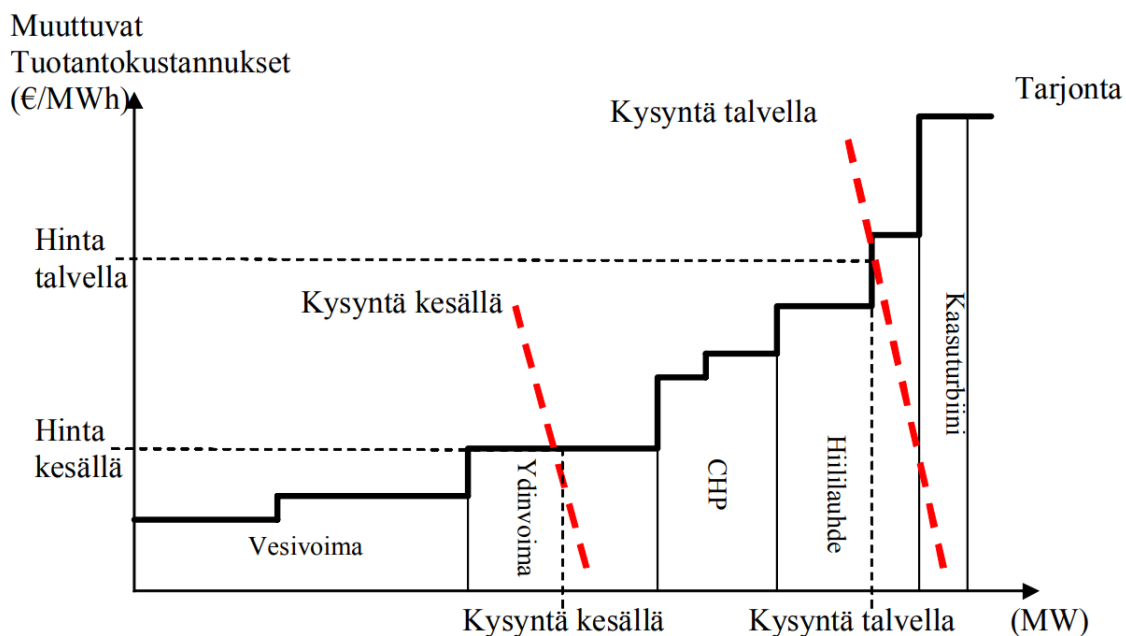
Fingrid vastaa yhteispohjoismaiseen sähköjärjestelmään kuuluvasta Suomen kantaverkosta, sähköjärjestelmän toiminnan edistämisestä sekä sähkömarkkinoiden kehittämisestä. Yhtiönä Fingridissä enemmistö päätösvaltaa pitävät hallussaan Suomen valtio sekä eräät muut julkisyhteisöt. (Fingrid, 2018a)

Kantaverkkoon kytkeytyvät suuret tuotanto- ja voimalaitokset sekä alueelliset jakeluverkot. Fingrid vastaa kantaverkon suunnittelusta, rakentamisesta ja ylläpidosta. Lisäksi se edistää sähköjärjestelmien käyttövarmuutta suunnittelulla, valvonnalla ja

ohjauksella. Näiden lisäksi Fingrid kehittää sähkömarkkinoiden toimintaa vastaamaan nykyhetken ja tulevaisuuden vaatimuksiin. (Fingrid, 2018a)

3.1 Day ahead- ja intraday-markkinat

Valtaosa sähkökaupankäynnistä tapahtuu vuorokausi- eli day ahead -markkinalla. Vuorokausimarkkinoilla sähköllä käydään kauppaa seuraavalle päivälle. Sekä myytävästä että ostettavasta sähköstä on jätettävä tarjoukset tunnin aikatasolla pörssiin edellisen päivän klo 13 mennessä. Tarjouksessa ilmoitetaan tunneittain ostettavan tai myytävän energian määrä ja tarjottu hinta. Kaupankäynnin tulokset julkaistaan saman iltapäivän aikana. Myyjien ja ostajien suunnittelemaat sähkömäärät ja tarjoushinnat määrittävät sähkön hinnan kullekin tunnille. Hinta muodostuu sille tasolle, jossa kysyntä ja tarjonta kohtaavat. Tätä havainnollistetaan kuvassa 5. Vuorokausimarkkinoihin Pohjoismaissa käytetään Nord Poolin ylläpitämää Elspot-markkinaa. (Partanen et al. 2016)



Kuva 5 Sähkön markkinahinnan muodostuminen. Esimerkkinä kaksi hintatilannetta. (Partanen et al. 2016)

Vuorokausimarkkinan kaupankäynnin täydentää päivänsisäinen eli intraday-markkina. Jos ennusteet muuttuvat, on päivänsisäisillä markkinoilla mahdollista käydä kauppaa kahta tuntia ennen käyttöhetkeä. Pohjoismaissa päivänsisäiseen markkinaan käytetään

Nord Poolin ylläpitämää Elbas-markkinaa. Markkinan etu sähkömarkkinatoimijoille on se, että se antaa mahdollisuuden sähkön myynnin ja hankinnan tasapainottamiseen lähempänä todellista käyttöhetkeä. (Partanen et al. 2016)

3.2 Tasesähkö

Vaikka sähkömarkkinatoimijan on pyrittävä ylläpitämään sähkön tuotannon ja kulutuksen – eli myynnin ja hankinnan – välinen tasapaino, tapahtuu toiminnassa aina virhettä suuntaan tai toiseen. Jotta sähkötaseen tasapaino säilyisi, on markkinaosapuolella oltava avoin toimittaja, jonka kautta se tasapainottaa sähkötaseensa tasesähköllä. Tasevastaavilla avoin toimittaja on Fingrid, jonka kanssa tehdään julkinen tasepalvelusopimus. (Fingrid, 2018b)

Tasevastaavan tasevastuuseen kuuluvat kaikki sen avoimessa toimituksessa olevat osapuolet, mutta myös näiden osapuolten avoimessa toimituksessa olevat, ketjussa alempana tulevat osapuolet. Tasevastaavan kulutus- ja tuotantotase koostuvat kokonaistuotantosuunnitelmasta, kiinteistä kaupoista sekä toteutuneesta tuotannosta sekä kulutuksesta. Tuotantotasesähkölle sovelletaan kaksihintajärjestelmää, jossa tasesähkön ostolle ja myynnille on omat hintansa. Kulutustasesähkössä noudatetaan yksihintajärjestelmää eli ostolle ja myynnille sovelletaan samaa hintaa. (Fingrid, 2018c)

Tasesähkön hinnat perustuvat säätösähkömarkkinan ylössäätö- ja alassäätöhintoihin kyseisellä tunnilla. Esimerkki tasesähkön hinnoista ylössäätö- ja alassäätötunteina on esitetty kuvassa 6. Säätösähkömarkkinoiden toimintaa kuvataan myöhemmin tarkemmin.

Jos tasevastaavan tuotantotaseen tasepoikkeama on ylijäämäinen eli tuotantoa on toteutunut enemmän kuin suunniteltu, joutuu se myymään syntyneen ylijäämän, jolloin Fingrid ostaa sen tasesähkön ostohinnalla. Ostohinta on kyseisen tunnin alassäätöhinta. Mikäli alassäätöä ei kuitenkaan ole tehty tai tunti on määritelty ylössäätötunniksi, noudatetaan vuorokausimarkkinoiden sen hetkistä Suomen spot-hintaa. (Fingrid, 2018c)

Tasevastaavan tuotantotaseen ollessa alijäämäinen – toteutunut tuotanto on pienempi kuin suunniteltu – on tasevastaavan ostettava alijäämän verran tasesähköä Fingridiltä alijäämän kattamiseksi. Tasesähkön hinta on tällöin tunnin ylössäätöhinta tai tunnin ollessa alassäätötunti vuorokausimarkkinoiden Suomen spot-hinta. (Fingrid, 2018c)

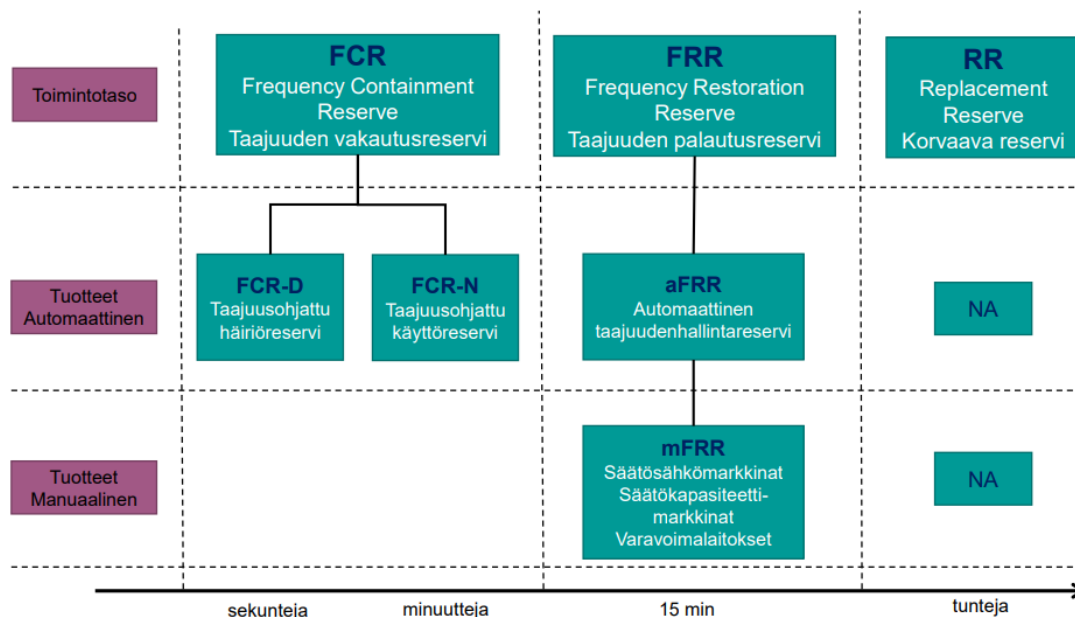
		2-hinta			1-hinta			
		Ylössäätötunti	Ei säätöjä	Alassäätötunti	Ylössäätötunti	Ei säätöjä	Alassäätötunti	
	Ylössäätöhinta	100	50	50	100	50	50	€/MWh
	Spothinta	50	50	50	50	50	50	-
	Alassäätöhinta	50	50	20	50	50	20	-
Tasevastaavan	tasesähkön ostohinta	100	50	50	100	50	20	-
	tasesähkön myyntihinta	50	50	20	100	50	20	-

Kuva 6 Säätosähkön ja tasesähkön hinnoitteluesimerkki. Tuotantotasesähkölle sovelletaan 2-hintajärjestelmää ja kulutustasesähkölle 1-hintajärjestelmää (Fingrid, 2018c)

Kulutustasesähkөөn sovelletaan yksihintajärjestelmää. Mikäli tasevastaavan toteutunut kulutus on suurempi kuin suunniteltu, on alijäämä katettava Fingridiltä ostettavalla tasesähköllä. Vastaavasti kulutustaseen ollessa ylijäämäinen, tasesähköä myydään Fingridille. Tasesähkön hinnaksi tulee tunnin yössäätö- tai alassäätöhinta riippuen siitä, kumpi tunti on kyseessä. Jos säätöä ei tunnille ole sovellettu ollenkaan, noudatetaan jälleen vuorokausimarkkinoiden Suomen aluehintaa. (Fingrid, 2018c)

3.3 Reaaliaikamarkkinat

Reaaliaikamarkkinoilla tarkoitetaan säätosähkö- ja reservimarkkinoita. Näiden tarkoitus on tasapainottaa käyttötunnin aikaiset poikkeamat sähköntuotannon ja kulutuksen välillä. Pohjoismaissa käytössä olevat reservit on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 Pohjoismaissa käytössä olevat reservit. Korvaavaa reserviä ei ole käytössä Suomessa. (Fingrid, 2017)

Sähköverkon perustaajuus on 50 Hz. Tällöin tuotantoa ja kulutusta on yhtä paljon. Jos kulutusta on enemmän kuin tuotantoa, verkon taajuus laskee. Vastaavasti ylituotannon aikana verkon taajuus nousee. Taajuuden normaalivaihtelu on 0,1 Hz suuntaansa perustaajuudesta eli taajuuden sallitaan vaihtelevan 49,9 ja 50,1 Hz välillä. (Fingrid, 2017)

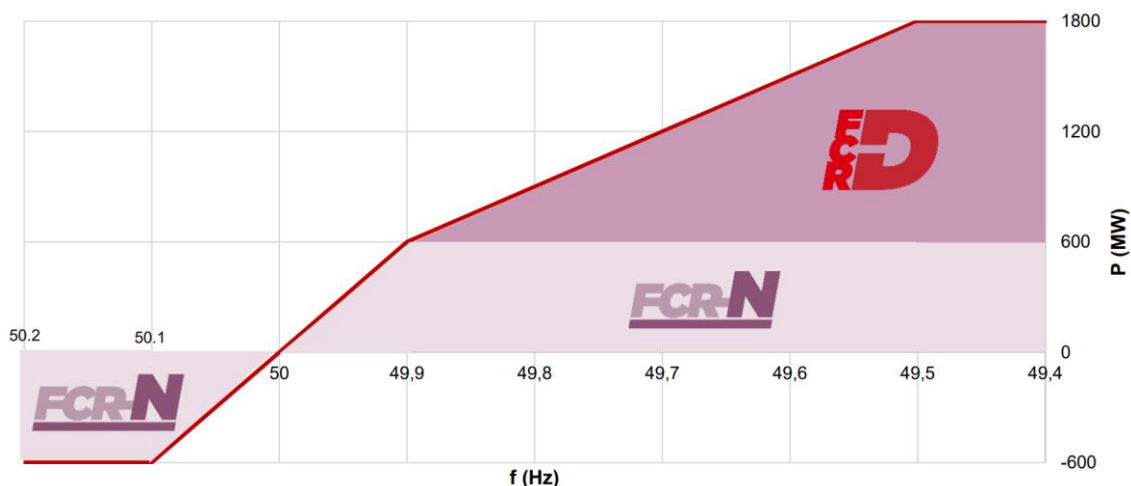
3.3.1 Taajuusohjattu käyttöreservi

Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) ovat automaattisesti toimivia sähköverkon taajuudenhallintaan käytettäviä reservejä. Taajuusohjattu käyttöreservi säätää verkon taajuutta jatkuvasti muutaman minuutin viiveellä taajuusmittauksen perusteella. Järjestelmä pyrkii pitämään taajuuden normaalilla vaihtelualueella eli 49,9 ja 50,1 Hz välissä. Säädon piirissä olevat kuormat ja tuotannot saavat korvauksen kapasiteetista sekä toteutuneista nettoenergiämääristä. Markkina toimii sekä vuosi- että tuntitasolla. (Fingrid, 2017)

3.3.2 Taajuusohjattu häiriöreservi

Mikäli sähköverkon taajuus laskee alle normaalitaajuusalueen, aktivoituu taajuusohjattu häiriöreservi pyrkien pitämään sen vähintään 49.5 Hz:ssä. Toisin kuin taajuusohjattu käyttöreservi, tämä reservi osallistuu siis vain ylössäätöön eli tuotannossa tehonlisäykseen ja kuormilla tehonpudotukseen. Sääto tapahtuu suuremmissa taajuuspoikkeamissa 5 tai 30 sekunnin kuluessa, jossa 5 sekuntia kuluu kapasiteetin aktivoimiseen 50 %:iin ja 30 sekuntia täyteen kapasiteettiin. Kyseessä on tuntikohtainen markkina, jolla korvauksen saa ylläpidetyn kapasiteetin mukaan. (Fingrid, 2018d)

Kuvassa 8 on havainnollistettu taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin aktivoituminen. FCR-N saavuttaa täyden säätövoimansa kun taajuuspoikkeama on 0,1 Hz perustaajuudesta. Mikäli taajuus on liian matala ja taajuuspoikkeama jatkaa kasvuaan, aktivoituu myös FCR-D, jonka teho kasvaa 49,5 Hz saakka. Kuten kuvasta havaitaan, vain FCR-N toteuttaa säätöä molempiin suuntiin. (Fingrid, 2017)



Kuva 8 FCR:n aktivoituminen sähköverkon taajuuden funktiona. (Fingrid, 2017)

3.3.3 Automaattinen taajuudenhallintareservi

Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) on muiden palautusreservituotteiden tapaan tarkoitettu taajuuden palauttamiseksi normaalialueelle. Tällä myös vapautetaan jo aktivoituneet taajuuden vakautusreservit eli FCR-N ja FCR-D takaisin käyttövalmiuteen. Järjestelmä säätää jatkuvasti tuotanto- tai kulutuskohteen ohjetehoa Fingridiltä lähtevän tehonpyyntisignaalin mukaan parin minuutin viiveellä. Automaattista

taajuudenhallintareserviä on käytetty vuodesta 2013 alkaen ja sen kautta hankitaan säätöä tietyille aamun ja illan tunneille, jotka on ilmoitettu etukäteen. (Fingrid, 2017)

Automaattisen taajuudenhallintareservin piirissä voi tehdä erikseen ylös- ja alassäätötarjouksia. Korvauksen saa sekä tarjotun kapasiteetin, että säädetyn energiamäärän mukaan. Fingrid hankkii automaattista taajuudenhallintareserviä myös muista Pohjoismaista. (Fingrid, 2017)

3.3.4 Säätosähkömarkkinat

Säätosähkömarkkinoita ylläpitävät Pohjoismaissa kantaverkkoyhtiöt. Suomessa tuotannon ja kuorman haltijat voivat tehdä säätosähkömarkkinasopimuksen Fingridin kanssa. Säättö voi siis tapahtua sekä ylös- että alassäätönä. Ylössäättö tarkoittaa tuotannon kasvattamista tai kulutuksen pienentämistä. Alassäättö puolestaan on joko tuotannon pienentämistä tai kulutuksen kasvattamista. (Fingrid, 2017)

Säätosähkömarkkinoilla tarjouksia voi jättää ja päivittää 45 minuuttia ennen käyttötuntia. Mikäli tarjouksia joudutaan aktivoimaan, tehdään se hintajärjestyksessä, kuitenkin tekniset reunaehdot huomioiden. Minimitarjouskoko on 10 MW tai 5 MW elektronisella tarjouksella. Säättö aktivoidaan manuaalisesti ja on toiminnassa 15 minuutin kuluessa aktivoinnista. (Fingrid, 2017)

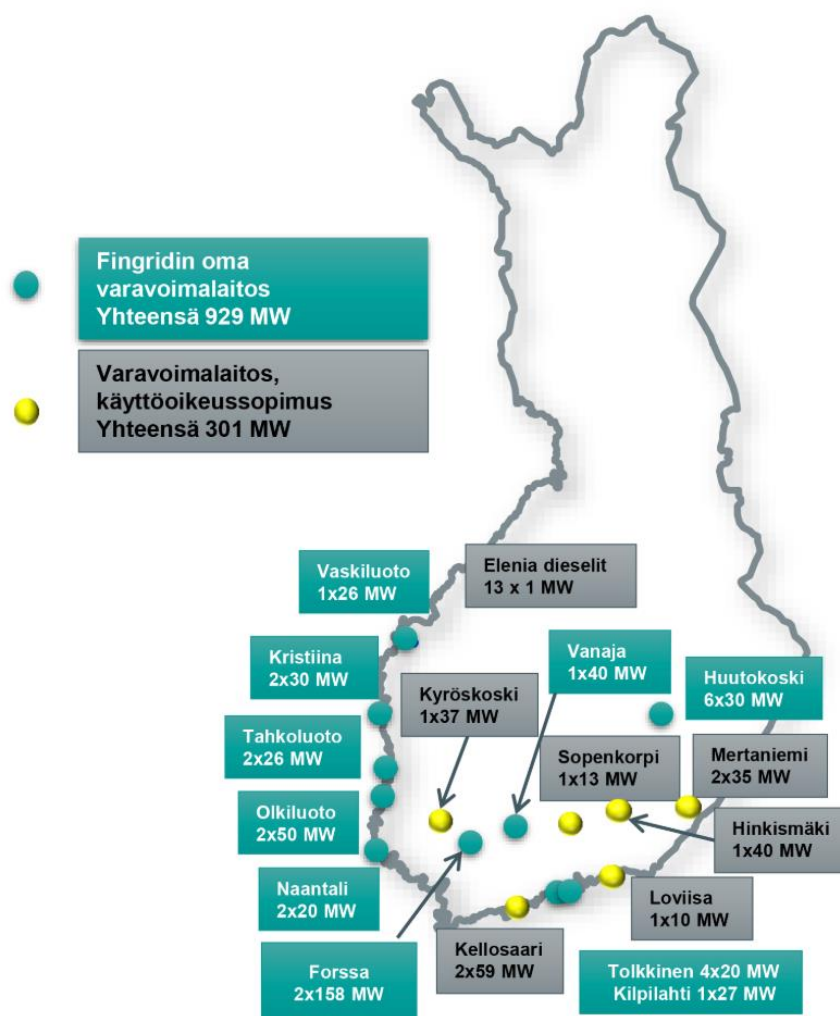
Korvaus säätosähkömarkkinoilla käytetystä säädöstä lasketaan tilatun energiamäärän ja tunnin aikana käytettyjen tarjousten mukaan. Ylössäädössä maksettava säätosähkön hinta on kalleimman käytetyn ylössäätötarjouksen hinta. Hinta on kuitenkin minimissään Nord Poolin Suomen aluehinta. Vastaavasti alassäätöhinta on halvimman käyttöön otetun alassäätötarjouksen hinta ja enintään Suomen aluehinta. (Fingrid, 2017)

Säätosähkön hinnassa on tyypillisesti suuria hetkellisiä vaihteluita. Säätosähkön ylössäätö- ja alassäätöhinnat ovat samalla tasesähkön hinnoittelun peruste. (Fingrid, 2017)

3.3.5 Nopea häiriöreservi

Nopea häiriöreservi on varmistettu ylössäätökapasiteetti 15 minuutin aktivointiajalle. Kantaverkkoyhtiön nopean häiriöreservin vaadittu määrä perustuu pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden sopimuksen mukaisesti oman alueensa käyttötilanteen mukaisesti määriteltyyn mitoittavan vian määrään (Fingrid, 2017). Mitoittavalla vialla tarkoitetaan suurinta mahdollista yksittäisestä viasta aiheutuvaa tehovajetta sähköverkossa.

Nopean häiriöreservin veloitteen Fingrid pyrkii täyttämään omistamillaan varavoimalaitoksilla sekä käyttöoikeussopimuksen piirissä olevilla vastaavilla laitoksilla. Nämä laitokset eivät ole käytettävissä kaupalliseen sähköntuotantoon. Fingridin omat ja käyttöoikeussopimuksen piirissä olevat varavoimalaitokset on esitetty kuvassa 9. (Fingrid, 2017)



Kuva 9 Fingridin omat ja käyttöoikeussopimuksen piirissä olevat varavoimalaitokset. (Fingrid 2018b)

Varavoimalaitosten lisäksi on vuonna 2016 otettu käyttöön säätökapasiteettimarkkinat täydentämään nopean reservin riittävyys. Säätökapasiteettimarkkinoilla korvataan päätyneitä suurteollisuuden kanssa tehtyjä sopimuksia irti kytkettävistä kuormista. Tarvittaessa Fingrid voi myös tilata häiriöreserviä naapurimaiden kantaverkko-yhtiöiltä. (Fingrid, 2017)

3.3.6 Säätökapasiteettimarkkinat

Säätökapasiteettimarkkinat ovat Fingridin keino varmistaa, että sillä on riittävästi ylössäätötarjouksia säätösähkömarkkinoille seuraavalle päivälle. Säätökapasiteettimarkkinoita käytetään nopean häiriöreservin varmistamiseen tilanteissa,

joissa lisähankintaa tarvitaan omien ja vuokrattujen varavoimalaitosten huoltojen tai muiden katkojen vuoksi. Säättökapasiteettimarkkinat on otettu käyttöön vuoden 2016 keväällä. Toukokuusta 2017 alkaen säättökapasiteettimarkkinat ovat sisällyneet säätösähkömarkkinasopimukseen. (Fingrid, 2017)

Säättökapasiteettimarkkinoilla reservimyyjä sitoutuu jättämään ylössäättötarjouksia säätösähkömarkkinoilla käyttöä edeltävänä päivä klo 13 mennessä. Säättökapasiteettitarjouksia käytetään säätösähkömarkkinoilla säättötarjousten jälkeen. Säättösähkömarkkinoista poiketen reservimyyjä saa korvausta luvatus tarjouksen jättämisestä riippumatta siitä, joudutaanko se ottamaan käyttöön. Tarjouksen mahdollisesta aktivoitumisesta saadaan lisäksi säätösähkön hinnan mukainen korvaus. Kapasiteetti kilpailutetaan aina viikoksi kerrallaan. (Fingrid, 2017)

3.4 Kysyntäjousto

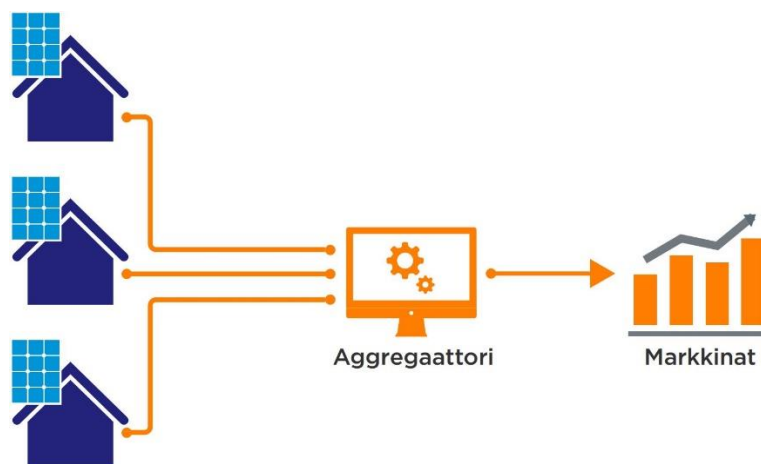
Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkönkäytön siirtämistä hintasignaalin perusteella niin, että käyttöä vähennetään kulutuksen – ja siten myös sähkön hinnan – ollessa korkea. Vastaavasti kulutus siirretään ajankohdalle, jolla kulutus on pienempää ja sähkönhinta edullisempi. Kysyntäjousto on myös käytön hetkellinen muuttaminen tehotasapainon ylläpitämiseksi. (Fingrid, 2018b)

Kysyntäjousto ei tarkoita suoraan energian säästämistä. Säästämällä energiaa sen kokonaiskulutus pienenee. Vastaavasti kysyntäjoustossa sähkön kulutus on pitkällä aikavälillä sama, mutta kulutuksen tehoa muutetaan eri ajankohtina. Kulutetun sähkön määrä pysyy ennallaan, ainoastaan sen ajallinen jakauma muuttuu. (Fingrid, 2018b) Joustomahdollisuudet koostuvat laajasta joukosta erilaisia toimintoja, jotka vaihtelevat epäsuorasta, hinnan perusteella tapahtuvasta säädöstä kantaverkkoyhtiön reservikuormana toimimiseen (Järventausta et al. 2015).

Kysyntäjouston tarve kasvaa, kun sähköverkkoon liittyy lisää joustamatonta tuotantoa, joka ei reagoi sähkön hinnan ja kysynnän muutoksiin. Esimerkiksi ydin-, aurinko- ja tuulivoima ovat tällaisia tuotantomuotoja. Ennen sähköverkon joustavuus on toteutettu pääasiassa vesivoiman tuotantoa säättämällä. Säättötarpeen kasvaessa tarvitaan kuitenkin lisää säättömahdollisuuksia. (Järventausta et al. 2015)

Perinteisesti suurteollisuus on osallistunut tehtasapainon ylläpitoon tarjoamalla kuormiaan reserviksi. Erityisesti kysyntäjoustoan kapasiteettiaan ovat tarjonneet metsä-, metalli- ja kemianteollisuus. Pienempien yritysten kysyntäjoustoan osallistumisen lisäksi Suomessa uusi tekijä ovat yritykset, jotka mahdollistavat pienkulutuksen tai -tuotannon osallistumisen eri markkinoille kokoamalla niistä riittävän suuria kokonaisuuksia. (Fingrid, 2018b)

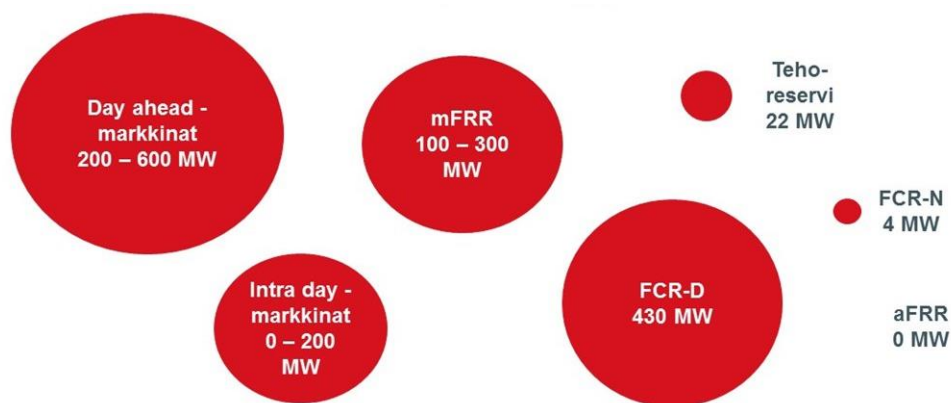
Joustopalvelua tarjoava taho eli aggregaattori pyrkii kokoamaan pieniltä toimijoilta tarpeeksi kapasiteettia, jotta sillä olisi järkevää toteuttaa kysyntäjousto eri markkinapaikoilla. Tätä havainnollistaa kuva 10. Aggregaattori ei kuitenkaan itse ole sähkön myyjänä tai ostajana, mutta se vastaa teknisestä toteutuksesta yksittäisten asiakkaiden kuormien ohjausta varten kootusti ja joustavasti. (Pahkala et al. 2018)



Kuva 10 Aggregaattori yhdistää usean asiakkaan sähkömarkkinaresursseja markkinoilla toimivaksi kokonaisuudeksi. (Pahkala et al. 2018)

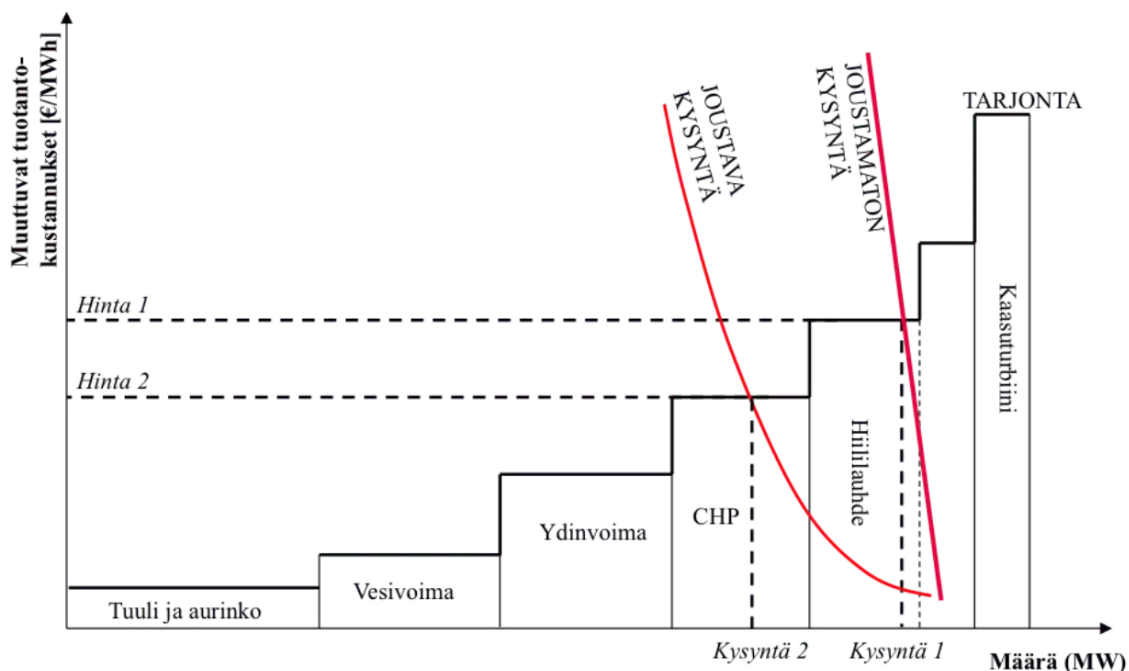
Kysyntäjousto voi hyödyntää usealla markkinapaikalla. Kysyntäjousto voi tarkoittaa esimerkiksi sähkön kulutuksen siirtämistä yksittäisen huomattavan hintapiikin ajalta edullisemmalle tunnille. Reservimarkkinoilla kysyntäjoustoan osallistua esimerkiksi taajuusohjatun häiriöreserviin liittyvällä irtikytkentäpotentiaalilla, joka taajuushäiriön aikana toteuttaa muutaman sekunnin irtikytkennän. Käytössä olevan kysyntäjoustoan laajuus eri markkinakohteissa on esitetty kuvassa 11. Koottu lista kaikista kysyntäjoustoan käytettävistä tuotteista, minimitarjoustehoista sekä muista tiedoista on tämän työn liitteenä 1. (Fingrid, 2018)

Kysyntäjouaston hyödyntäminen valituilla markkinoilla voi vaatia yritykseltä kustannuksia käyttöönottovaiheessa. Oikein toteutettuna se voi kuitenkin kustannustehokas ratkaisu, joka tuo taloudellista hyötyä kohtuullisella aikavälillä.



Kuva 11 Kysyntäjouaston määrä Suomessa. Tilanne 18.1.2018 eri markkinapaikoilla (Fingrid, 2018b)

Laaja kysyntäjouaston käyttö vaikuttaisi kysyntäjoustokohteiden lisäksi koko sähköjärjestelmään. Eri sähkön tuotantomuotoja otetaan käyttöön sähkön kulutuksen mukaan niin, että muuttuvilta kustannuksiltaan kallein tuotantomuoto otetaan käyttöön viimeisenä. Sähkön tuntihinta taas on verrannollinen kalleimman käytössä olevan tuotantomuodon kustannukseen. Mikäli sähkön kysyntä – eli kulutus – joustaa tarpeeksi, voidaan sähkön kysyntäkäyrää siirtää huippukuorman kohdalla kysynnän hetkellisellä vähentämisellä. Tällöin on mahdollista, että kysynnän mukainen tarjonta saadaan katettua halvemmilla tuotantomuodoilla kuvan 12 mukaisesti. Tällöin jouaston vaikutus näkyisi sähkön hinnassa koko markkinan osalta. Myös niille, jotka eivät joustoja kyseisellä hetkellä hyödynnä. (Honkapuro, 2016)



Kuva 12 Joustavan kysynnän vaikutus sähkön tuotannon muuttuviin tuotantokustannuksiin. Kuvassa kysynnän joustuksen ansiosta tarvittavaan tuotantoon riittävät CHP-tuotanto ja sitä halvemmat tuotantomuodot. (Honkapuro, 2016)

Toimiva kysynnän jousto hyödyttää useita markkinaosapuolia. Kantaverkkoyhtiölle se mahdollistaa yhden keinon tehotasapainon hallintaan. Sähkön myyjä voi hyödyntää joustoa hankinnan suunnittelussa ja taseen hallinnassa sekä liiketoiminnan kehittämisessä. Jakeluverkkoyhtiö hyötyy verkon joustavuudesta esimerkiksi mitoitustehon suunnittelun näkökulmasta. Loppukäyttäjälle muodostuu keino säästää sähkön hinnassa siirtämällä sitä edullisemman kulutuksen hetkelle sekä hyödyntämällä tehokkaammin oman pientuotannon. Erilaisilla laite- ja järjestelmätoimittajille avautuu mahdollisuus uusiin liiketoimintamahdollisuuksiin esimerkiksi kysyntäjouston käytön aggregoimisessa. (Järventausta et al. 2015)

3.5 Sähkömarkkinoiden kehitys

Perinteisessä sähköjärjestelmässä tarvittava joustavuus on saatu aikaan kulutusta säättämällä. Tämä tapahtuu esimerkiksi vesi- ja lauhdevoimalaitosten avulla. Heikosti säädettävän tuotannon osuus on kuitenkin kasvussa ja joustovaraa on löydettävä myös uusista kohteista. Kulutuksen jousto on olennainen osa tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmää. (Järventausta et al. 2015)

Oleennaista on myös se, että joustoon kykenisi tulevaisuudessa mahdollisimman moni sähkömarkkinoilla toimija. Perinteinen sähkönkulutuksen joustaja Suomessa on suurteollisuus. Sillä on pitkä kokemus aktiivisesta toiminnasta sähkömarkkinoilla sekä kulutuksen mukauttamisesta hintasignaalin perusteella. (Fingrid, 2018b)

Nykyäänkin osa kuluttajista ostaa sähkönsä tuntihinnoiteltuna ja hintatietoa seuraamalla saa mahdollisuuden ajoittaa kulutustaan edullisemmin. Tämä vaatii kuitenkin manuaalista seuranta ja kulutuksen säätöä. Tulevaisuudessa kuluttajat voivat ulkoistaa automaattisen kysyntäjoustopalveluntarjoajalle tai sähkönmyyjälle. (Fingrid, 2018b)

Kuluttajista älykkäästä sähkön käytöstä hyötyisivät erityisesti sähkölämmitteiset kotitaloudet. Kokoamalla yhteen tällaisia kotitalouksia saadaan teholtaan jo merkittävä joustokapasiteetti (Fingrid, 2018b). Tulevista säätökohteista esille on nostettu usein sähköautot, joiden akkujen latauksen ajankohdalla voidaan merkittävästi vaikuttaa kuluttajan kustannuksiin ja vastaavasti sähköjärjestelmän reagointikykyyn (Fingrid, 2018d). Luonnollisesti mistään näistä tapauksista ei saa aiheutua huomattavissa olevaa haittaa loppukäyttäjälle, sillä muutoin joustavaan kulutukseen liittymisen houkuttelevuus laskee.

Vaikka joustavuudella joudutaan ikään kuin reagoimaan energian tuotantomuotojen kehitykseen, voidaan asia nähdä myös toisin päin. Joustava kysyntä edistää sekä aurinko-että tuulisähkön kapasiteetin kasvua ja parantaa niiden integroitumista järjestelmään. Kysyntäjousto on siis itsessään näitä energiamuotoja tukeva tekijä. Täten joustava sähköjärjestelmä edistää vähäpäästöisen energiajärjestelmän kehittymistä myös välillisesti.

Sähköntuotannon pitkän ajan ennustettavuuden ja säätövaran heikentyessä sähkömarkkinoilla korostuu siis kulutuksen hallinta. Aktiivinen kuluttaja voikin hyötyä joustavuudestaan. Sähkön hinta seuraa yleensä sähkön jouston tarvetta, eli on kalliimmillaan silloin, kun kulutusta on paljon suhteessa tuotantoon. Tällöin puhtaasti hintasignaalin ohjaama jousto tuo käyttäjälle taloudellista hyötyä, mutta samalla se myös luonnostaan vakauttaa sähköjärjestelmää. (Fingrid, 2018d)

Nykyään myös pienemmän kokoluokan sähkönkuluttajien on mahdollista hyödyntää joustavaa kulutusta. Tämä vaatii markkinoiden läpinäkyvyyttä ja hyvää tiedon saatavuutta. Tällöin jokaisella kuluttajalla on mahdollisuus osallistua sähkömarkkinoiden joustavuuden edistämiseen ja hyötyä siitä. Tämä voi tapahtua suoraan tai palveluntarjoajan välityksellä. (Fingrid, 2018b)

Sähkömarkkinoilla kaupankäynnissä on tähän asti toimittu tunnin resoluutiolla. Taseselvitykset ja sähkön hinta on määräytynyt tuntitasolla. Tähän on tulossa muutos, kun Euroopan Unionin jäsenmaissa ollaan siirtymässä 15 minuutin tasejaksoon. Näin tehdään myös Pohjoismaissa, joissa tarkoituksena on toteuttaa siirtyminen yhtäaikaisesti kaikkien kantaverkkoyhtiöiden osalta vuonna 2020. Vastaisuudessa taseselvitys siis toteutetaan 15 minuutin jaksoissa ja samalla myös päivänsisäinen markkina ja säätösähkömarkkinat siirtyvät tälle aikaresoluutiolle. Näin ollen sähkökaupankäynnin mahdollisuus siirtyy yhä lähemmäksi todellista käyttöhetkeä. (Fingrid, 2018b)

4 ENERGIANHALLINTAJÄRJESTELMÄT

Energiajärjestelmien toimintakokonaisuuteen liittyy paljon tekijöitä varsinaisen tuotannon, siirron ja käytön lisäksi. Tietotekniikkaa tarvitaan yhä enenevässä määrin kokonaisuuden seurantaan, hallintaan ja optimointiin. Pakollisten toimintojen suorittamisen lisäksi teknologia myös vähentää manuaalista työtä sekä virheiden todennäköisyyttä. Vastaavasti ihmisille jää enemmän aikaa toiminnan kehittämiseen ja tehokkaaseen työskentelyyn, kun automaatio, datankäsittely ja yhä enemmän myös IoT hoitavat rutiinitoimenpiteet.

Edellä mainituista syistä johtuen energiateollisuuteen liittyvillä laitoksilla, kuten myös muillakin tuotantolaitoksilla, on tyypillisesti käytössä toiminnanohjaus- ja automaatiojärjestelmien lisäksi erilaisia raportointi-, hallinta- ja optimointijärjestelmiä tai -palveluita. Näiden palveluiden tarkoituksena on esimerkiksi erilaisten tunnuslukujen laskenta ja raportointi perustuen laitoksen järjestelmistä saatavaan dataan, päästöjen seuranta ja viranomaisraportointi, laskutuksen perusteena oleva laskenta tai käytön ja kunnossapidon optimointi.

Joillain taustajärjestelmän osa-alueilla voi olla suora ohjausyhteys automaatioon, eli ne osallistuvat suoraan kohdeprosessin ohjaukseen. Vastaavasti niitä voidaan käyttää vain informaation laskentaan ja esittämiseen tarjoten tukea päätöksentekoon. Tällöin ohjaustoimenpiteet on kuitenkin tehtävä erikseen siinä järjestelmässä, jossa ne on tarkoitus toteuttaa.

Aikaisimmat energiateollisuudessa käytettävät automaattiset raportointijärjestelmät olivat käytännössä käytönvalvontajärjestelmiä, joista tarkkailtiin tärkeitä tunnuslukuja sekä teho- ja energiatietoja laskutuksen perusteeksi. Raporttiohjelmat koostuivat pääosin numeerisesta datasta; visuaalisuus eli esimerkiksi diagrammit ja viimeistellyt prosessikaaviot ei ollut prioriteettina. Toisaalta silloiset työkalut eivät tätä juuri mahdollistaneetkaan. (Vihinen, 2018)

Parin vuosikymmenen takaisin raportointijärjestelmiin verraten nykyaikaisissa järjestelmissä visuaalisuus on noussut erittäin tärkeään osaan. Toiminnan tarkastelu voi tapahtua kokonaan graafisia toimintoja hyödyntäen eikä numeromuotoisia taulukoita

välttämättä tarvitse tarkastella muuten kuin lukemien ollessa poikkeuksellisia. Järjestelmiltä myös odotetaan selkeää ja miellyttävää visuaalista käyttöliittymää, mikä ei ollut aiemmin kovinkaan tärkeä kriteeri. (Vihinen, 2018)

Yksi suomalainen esimerkki energiatietojen hallintaan käytettävistä sovelluksista on Fortumin palveluihin sisältyvä TOPi, johon voi kuulua toimituksesta riippuen EMS-ratkaisu (energianhallintajärjestelmä), käyttötalouden tarkkailu sekä prosessitietojen hallintajärjestelmä. Järjestelmän käyttöliittymä on selainpohjainen, mikä on nykyaikana yleistä. (Fortum, 2018)

Aiemmin taustajärjestelmien esittämä data koostui ainoastaan historiatiedoista sekä reaaliaikaisesta datasta. Tulevaisuuden ennustamista ei katsottu samassa määrin tarpeelliseksi kuin tällä hetkellä. Nykyinen sekä lähitulevaisuuden kehityssuunta onkin vahvasti ennustamisessa ja optimoinnissa sekä niihin liittyvässä ennakoivassa käytössä ja kunnossapidossa. Tausta- ja raportointijärjestelmien avulla pyritään nykyisin entistä monipuolisempiin analyyseihin, tunnuslukujen vertailuun sekä optimointiin. (Vihinen, 2018)

Ennustetoiminnallisuus sisältyy myös tässä työssä käytettävään Synchron Tech:in toimittamaan SyncPower-ohjelmistoon. Tuotteella voidaan suorittaa voimalaitosten taselaskentaa, hallinnoida energian hankintaa ja laskutusta sekä toteuttaa päästölaskenta ja -raportointi. Ennusteominaisuutta on hyödynnetty esimerkiksi kaukolämmöntuotannossa, jossa palvelu päivittää jatkuvasti tuotannon ennustetta säätietojen, sähkön hinnan ja prosessiarvojen mukaan. (Vihinen, 2018)

Ennustamiseen ja optimointiin liittyy tulevaisuudessa ja osittain jo nykyäänkin koneoppiminen sekä laajemmin tekoäly. Nämä teknologiat auttavat muun muassa seuraamaan komponenttien kulumista ja antavat tietoa vaihdon tai huollon tarpeesta. Vastaavasti data-analytiikkaa hyväksikäyttäen voidaan esimerkiksi etsiä tasevirheitä tilanteissa, joissa jotkin prosessin mittaustiedoista ovat ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi suomalainen kunnossapito- ja käyttöpalveluja tarjoava Maintpartner toimittaa MP Intelligence -analytiikkaratkaisua. Kyseinen järjestelmä käsittelee kaiken saatavilla olevan signaalidatan prosessista ja pyrkii havaitsemaan siitä toistuvia kaavoja, jotka voivat ennakoida häiriöitä. (Maintpartner, 2018)

Suuremmista toimijoista esimerkiksi ABB tarjoaa myös prosessitiedon analysointiin tarkoitettua palvelua. ABB Ability on energiatiedon hallinnointiin ja raportointiin kehitetty sovellus. Voimalaitoskäytössä ohjelmisto kerää dataa prosessista ja antaa ilmoituksen silloin, kun jokin tunnusluku tai mittausarvo ei ole halutulla alueella. Historiadatan ja laitoksen toiminnan perusteella voidaan analysoida muutoksien syyt ja kohdentaa käyttö- ja kunnossapitotoimenpiteitä. (ABB, 2018)

Yleistynyt tekijä on myös päästölaskenta ja päästöjen viranomaisraportointi. Ilmapäästöjen seuranta ja vaatimukset ovat entistä tarkempia. Tämä kehitys koskee myös yhä pienempiä yksiköitä. Tarkkojen päästömäärien määrittelyssä automaattinen laskenta kerätyn datan perusteella sekä helppo raportointi eteenpäin on tärkeää. (Vihinen, 2018)

Palveluiden käyttö tapahtuu usein selaimen kautta, mikä onkin helppo ratkaisu palvelua käyttävän henkilöstön sekä sen ylläpitäjän kannalta. Aiemmin ei selainpohjainen käyttöliittymä ollut yleinen, eivätkä käyttäjät pitäneet oleellisena sitä, että selaimen kautta voitaisiin tarkastella ja jopa ohjata tärkeitä prosesseja. Palveluna toimitettavassa ratkaisussa itse järjestelmä ei edes sijaitse fyysisesti asiakaskohteessa vaan se toimii toimittajan palvelimessa tai sitä varten hankitussa pilvipalvelussa. (Vihinen, 2018)

Ennen raportointijärjestelmissä tyypillisiä olivat suurten toimijoiden toimittamat yhdenmukaiset järjestelmät. Tällaisissa järjestelmissä ei raportoinnin osalta juuri tehty kustomointia asiakaskohtaisesti muuten kuin välttämättömiltä osin. Muutosten tekeminen järjestelmään ei ollut mahdollista asiakkaalle ja toimittajan tekemänäkin kustannukset asiakkaalle olivat verrattain suuret. Nykyisin on yleistä antaa asiakkaalle ainakin jonkintasoiset työkalut palvelun muokkaamiseen. Vastaavasti monesti palvelut ovat kehittyneet muotoon, jossa ne ovat helpommin kustomoitavissa palvelun omia työkaluja käyttäen. Teknologian ja sovelluksien kehittyessä myös pienemmät toimijat voivat tarjota kattavia energian hallinta- ja raportointisovelluksia. (Vihinen, 2018)

Digitalisaatio tukee energiateollisuuden sovellusten kehitystä. Digitalisaation käsitteeseen liitetään nykyään usein esineiden internet (IoT). Toinen yleinen suomenkielinen termi samalle käsitteelle on teollinen internet, mikä sopii hyvin tämän työn viitekehykseen. Kuluttajatuotteiden suhteen IoT:ta kuulee pidettävän uutena innovaationa, mutta teollisuudessa sitä hyödynnetään jo monin paikoin. Toki tarjottavien

IoT-ratkaisujen määrä ja laajuus on kasvanut, mutta käyttöä niillä on ollut pienemmässä mittakaavassa jo kauan. (Lanotte & Merro, 2018).

IoT:lla tarkoitetaan yleisesti laitteita ja sensoreita, jotka kykenevät keräämään dataa ja jakamaan sitä toisilleen tai erilaisille ohjelmistoille sekä olemaan yhteydessä verkkoon, esimerkiksi pilvipalveluihin. Käsite on laaja ja vaihtelee jonkin verran lähteestä riippuen (Lanotte & Merro, 2018).

Esineiden internetin ”esineiksi” ajatellaan usein erilaisia kuluttajatuotteita, kuten älykkäitä kodinkoneita tai ajoneuvoja. Kuitenkin IoT-ratkaisuilla on merkittävä potentiaali myös teollisuudessa, jossa IoT mahdollistaa tuotantoprosessin eri osien tehokkaan tiedonsiirron ja yhteistoiminnan (Wortmann & Flüchter, 2015). Toimiessaan nämä tekijät voisivat olla hyödyksi esimerkiksi prosessin pullonkaulojen tunnistamisessa sekä niiden ennakoinnissa ja minimoimisessa. Yksinkertaiset, verkkoon yhteydessä olevat komponentit voivat olla kustannustehokkaita eikä niiden energiankulutus ole merkittävä. Suuri määrä tällaisia komponentteja voi tuottaa valtavan määrän dataliikennettä, jonka käsittely ja analysointi on suurempi haaste kuin itse komponenttien ohjelmointi ja toimivuus (Mukhopadhyay, 2014). Kuitenkin myös tietoliikenteen suurien siirtonopeuksien ja muistitilan ylläpidon kustannukset ovat pienentyneet, osittain pilvipalveluiden käytön myötä (Gilchrist, 2016). Tiedon siirtämisen ja säilytyksen sijaan olennainen ratkaisutekijä onkin nimenomaan datan analysointi ja käsittely niin, että sitä kyetään hyödyntämään halutulla tavalla.

Esimerkki tekoälyä hyödyntävästä optimointijärjestelmästä on ÅF Consult:in suunnittelema Balance +, joka toimittajan mukaan hyödyntää tekoälyä verratessaan prosessin tilatietoja historiadataan analysoidakseen muutoksia prosessissa. Tällä pyritään vaikuttamaan esimerkiksi rakenteelliseen kulumiseen, värinöihin ja likaantumiseen määrittämällä mahdollisimman optimaaliset toiminta-arvot. Järjestelmä on suunniteltu nimenomaan voimalaitoksen höyryprosessin optimointiin. (ÅF Consult, 2018)

5 NURMON AURINKO

Nurmon Aurinko -projektin tarkoitus on toteuttaa laaja teollisen mittakaavan aurinkosähköpuisto Atria Suomi Oy:n Nurmon tuotantolaitoksen yhteyteen. Nurmon Aurinko Oy on Atrian sekä aurinkovoimalatoimittaja Solarigo Systems Oy:n yhteisyritys. Aurinkovoimalan tuottama sähkö tulee tehtaan omaan käyttöön ollen noin 5 prosenttia tehtaan kokonaissähkönkäytöstä vuositasolla. Järjestelmän perustiedot on koottu taulukkoon 1. Aurinkopuiston asennus aloitettiin kesällä 2017 ja valmiiksi järjestelmän on tarkoitus tulla vuoden 2018 syksyllä. (Nurmon Aurinko, 2018)

Taulukko 1 Atrian Nurmon tehtaiden aurinkovoimalan perustiedot (Nurmon Aurinko, 2018)

Aurinkovoimalaitoksen kapasiteetti	6 MW
Vuosituotanto (ennustettu)	5 600 MWh
Osuus tuotantolaitoksen sähkönkulutuksesta	5 %
Aurinkopaneelien määrä	24 000 kpl
Yhteispinta-ala	36 000 m ²
Jäähdytysenergian säästö	600 – 800 MWh/a
Kokonaisinvestointi	6,8 M€
Teknillis-taloudellinen käyttöikä	40 a

Aurinkopaneeleista suuri osa sijaitsee tehdasalueen yhteydessä olevalla asfalttikentällä, joka on nähtävissä kuvassa 13. Tätä pienempiä yksiköitä sijaitsee tehdaskiinteistöjen katoilla. Paneeleita on hankittu useilta eri toimittajilta ja näin ollen myös paneelien ominaisuudet todennäköisesti eroavat jonkin verran toisistaan. Suuri määrä paneeleita samoissa olosuhteissa lähellä toisiaan mahdollistaakin eri paneelien vertailukelpoisen tarkkailun. Lisäksi kentällä sijaitsevista paneeleista osa on asennettu muita jyrkempään

kulmaan, mikä mahdollistaa tuotannon vertailun myös asennuskulman osalta. Myös kääntyvien paneelien toimintaa testataan. (Vairinen, 2018)



Kuva 13 Osa Nurmon Aurinko -aurinkosähköpuistosta. Suurin osa paneeleista on asennettu Atrian tehtaiden viereiselle asfalttikentälle, jossa sijaitsi ennen avokomposti.

Hankkeeseen liittyy myös testauskohteita, joihin kuuluu kiinteistön sisäinen älykäs sähköverkkojärjestelmä. Järjestelmään liittyy energian varastointiin käytettävä akkukapasiteetti, jäähdytysjärjestelmien joustava sähkönkulutus sekä sähkönkäytön kysyntäjousto. (Nurmon Aurinko, 2018)

Tuotantolaitoksella on tarkoitus testata uusiutuvan energian varastointia sähköakkuja käyttäen (Nurmon Aurinko, 2018). Akkukapasiteetilla voitaisiin parantaa ennestään sähkönkäytön joustavuutta, kun akkua purettaisiin kalliimman tunnin aikana erityisesti silloin, kun aurinkopaneeleista saatava teho on vähäinen.

Tuotantolaitoksen viilennysjärjestelmän puhaltimien toimintaa säätämällä voidaan systeemin hetkellistä tehontarvetta muuttaa. Tehonsäädöllä voidaan siirtää sähkönkulutusta sähköverkon taajuuden osalta parempaan ajanhetkeen. Järjestelmän osalta riittää, että lämpötilasäätö pysyy vaadituissa rajoissa. Säätö tapahtuu SEAM Groupin toimittaman kysyntäjoustopalvelun ohjauksen perusteella. Tarkempi selostus säätöjärjestelmän teknisistä ominaisuuksista on esitetty luvussa 6.

Diplomityön kohteena oleva kysyntäjoustojärjestelmä liitetään osaksi taajuusohjattua käyttöreserviä (FCR-N). Tuotantolaitoksen älykkäissä sähköverkossa olevat komponentit voivat siis säätää toimintaansa sähköverkon taajuuden mukaan joustavasti. Tällä tavoin tuotantolaitos päätehtävänsä lisäksi edistää tehokasta sähkönkäyttöä ja saa samalla korvausta reserviin annetusta kapasiteetista ja sen käytöstä.

6 JÄRJESTELMÄKUVAUS

Tässä luvussa kuvataan Nurmoon Atrian tehtaille toteutettavan smat grid -järjestelmän toiminta niiltä osin, mitä vaaditaan ensimmäisen kysyntäjoustokohteen ohjauksen muodostamiseen ja tiedonsiirtoon. Järjestelmä on tästä laajennettavissa myöhemmin vastaamaan koko laitospokonaisuuden kysyntäjoustokapasiteetista sekä muista tarvittavista laskenta- ja raportointitoimenpiteistä. Toiminnan kuvaus rajoittuu ohjausarvojen laskentaan ja saattamiseen kiinteistöautomaation liityntäpisteeseen eikä siinä oteta kantaa kolmannen osapuolen toteuttamaan ohjaussignaalien käsittelyyn muuten kuin yleisellä tasolla.

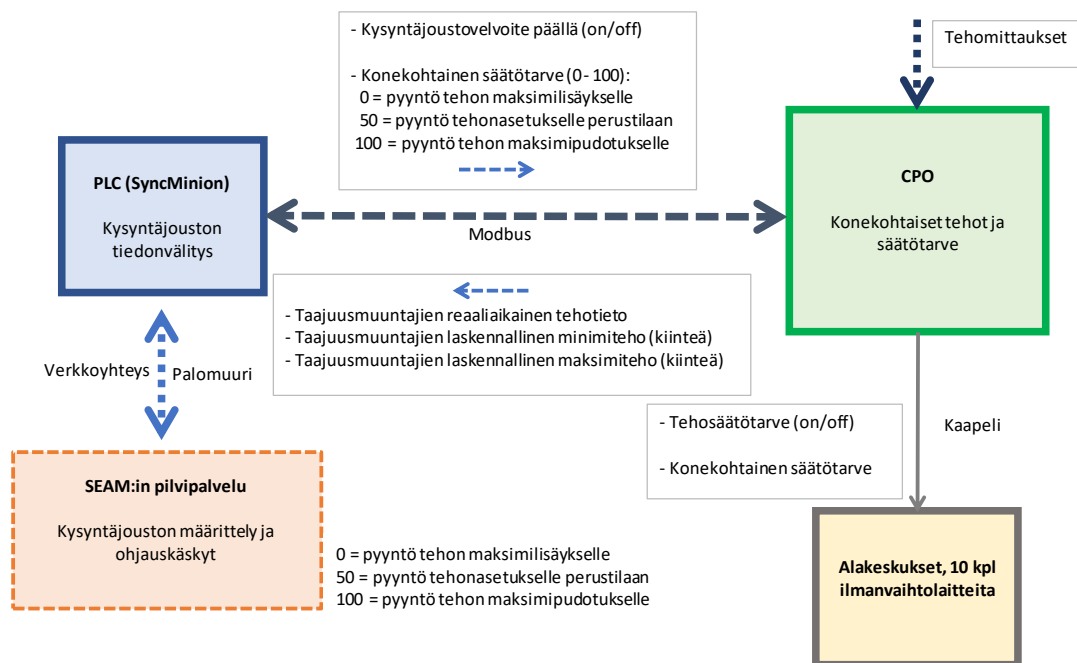
Kokonaisuutena systeemi koostuu fyysisestä tiedonkeruulaitteistosta ja siihen liittyvistä kytkennöistä, sekä pilvessä toimivasta SyncPower-ohjelmistosta, joka vastaa tehotietojen talletuksesta, taajuusarvojen tarkkailusta sekä ohjausarvojen laskennasta ja lähetyksestä. Tiedonkeruulaitteisto koostuu kohteessa olevasta PC:stä sekä sen kytkennöistä paikalliseen virtuaaliverkkoon sekä automaatioon. Automaatioon yhteys tapahtuu automaation oman PC:n kautta, joka toimii niin ikään tiedonvälittäjänä.

6.1 Laitteisto

Tämän työn käsittelemässä kysyntäjoustokohteessa säätökapasiteetti saadaan kylmätilojen viilennykseen käytettävistä kylmäkoneista. Tarkemmin sanottuna jousto toteutetaan ohjaamalla jäähdytinlaitteistossa käytettävien puhaltimien tehoa. Ensimmäisessä vaiheessa säädön piiriin kytketään kymmenen konetta ja myöhemmässä vaiheessa kapasiteettia voidaan lisätä säädettävän tehomäärän kasvattamiseksi. Ensimmäisen vaiheen tarkoitus on todentaa tehojouston toimivuus. Ensimmäisessä vaiheessa ohjattavan tehon säätöalue on hieman yli 100 kW. Täten säätötehoa on noin 50 kW suuntaansa.

Tehojouston toteuttamiseksi luodaan tarvittava tiedonsiirtojärjestelmä. Tätä varten tarvitaan tiedonkeruulaitteisto, joka välittää tietoa kaksisuuntaisesti sekä automaatioon, että siitä pois päin. On myös luotava ympäristö, jossa tehon jouston määrittely tapahtuu taajuuspoikkeaman perusteella. Kyseinen ohjaussignaalin tulee siirtää automaatioon,

jossa sen perusteella säätötieto ohjataan kylmäkoineita vastaaville taajuusmuuntajille. Tehon ohjaukseen liittyvän järjestelmän periaatetta on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14 Periaatekuva sähkötehon ohjauksesta

Kahden kohteessa olevan PC:n (kuvassa sininen ja vihreä suorakulmio) välinen yhteys on kaksisuuntainen, samoin kuin PLC-yksikön ja pilvipalvelun. Lisäksi CPO-yksikkö saa tehotietoja automaatiosta ja antaa ohjaukskäskyt kylmätilojen ilmanvaihtolaitteille.

6.1.1 PLC-yksikkö

PLC-yksikkö ohjaa kysyntäjoustop käyttöä lähettäen tietoa Modbus-väylän kautta kiinteistöautomaatioon kuuluvaan CPO-yksikköön. Sähköverkon taajuuden ja muiden tekijöiden perusteella PLC määrittää kysyntäjoustop käytön ja lähettää siitä tiedon CPO:lle. PLC kertoo, onko kysyntäjoustopvelvollisuus kullakin hetkellä voimassa vai ei. Kysyntäjoustop ollessa käytössä lähetetään pyyntö tehonsäädöstä. Pyyntö lähetetään lukuarvona 0 – 100, jossa nolla tarkoittaa pyyntöä tehon nostamisesta maksimiin ja 100 tarkoittaa pyyntöä tehon pudotuksesta minimiin. Tässä yhteydessä suurempi arvo tarkoittaa siis suurempaa tuotantovajetta sähköverkossa. Näiden välillä säätö määräytyy lineaarisesti ja arvo 50 tarkoittaa pyyntöä palauttaa teho perusarvoonsa.

Järjestelmässä PLC-yksiköksi nimetty laite on ohjelmoitavaa logiikkaa hyödyntävä mini-PC. Laitteeseen on asennettu tarvittava järjestelmä tiedonsiirtoa varten. Järjestelmä on Synchron Tech:in toimittama ja siitä käytetään nimitystä SyncMinion.

Projektin valmisteluvaiheessa laite tilattiin build-to-order periaatteella, jolloin sen komponentit voitiin valita projektin sekä fyysisen asennusympäristön vaatimuksiin sopivaksi. Laitteen tilauksen yhteydessä on otettava huomioon toimittamiseen kuluva aika. Suomeen tilatessa tämä voi olla tilanteesta riippuen yli kaksi kuukautta.

SyncMinion ja siten PLC-laite on toiminnaltaan hyvin yksinkertainen eikä se sisällä juurikaan älyä. Järjestelmä on asennettu ennen kohteeseen toimittamista ja toiminnassa se osaa pyytää verkon kautta yhteyttä ennalta määrätyllä tavalla. Tämän yhteyden yli se kykenee välittämään tietoa, jota siihen on siirretty toisesta lähteestä. Varsinainen tietokanta sijaitsee erillisellä palvelimella, joka voi olla sijoitettuna toimittajan tiloihin tai toteutettu pilvipalveluna. Käytännössä SyncMinion toimii siis kehittyneenä tiedonvälittäjänä.

Yksinkertaisesta toiminnasta on muun muassa se etu, että laitteen jostain syystä rikkoutuessa voidaan uusi laite esiasentaa valmiiksi ja lähettää se tämän jälkeen asiakkaalle. Tällöin riittää, että kytkee laitteen paikalleen tarvittavilla liitännöillä. Kaikki toiminta tämän jälkeen voidaan suorittaa etänä. Näin ollen laitteistoasennukseen kohteessa ei kulu juurikaan aikaa tai resursseja.

Nyt asennetun PC:n ja SyncMinion-järjestelmän ei tarvitse rajoittua tiedonsiirroltaan tässä diplomityössä kuvattuihin tietoihin. Samaa laitetta voidaan käyttää tulevien kysyntäjoustokomponenttien datan välittämiseen sekä myös muihin samalla tuotantoalueella tapahtuviin järjestelmähankkeisiin. Mikäli esimerkiksi halutaan muodostaa yhteinen taustajärjestelmä aurinkovoimalaitosten tiedoista, voidaan dataa mahdollisuuksien mukaan siirtää tällä samalla laitteella. Datan siirtokapasiteetti riittää hyvin esimerkiksi mainittujen laitosten tietojen käsittelyyn tarvittavan tiheällä resoluutiolla.

6.1.2 CPO-yksikkö

Kiinteistöautomaatioon kuuluva CPO-yksikkö vastaanottaa tietoa PLC:stä ja välittää sen perusteella kysyntäjouaston mukaisen ohjaussignaalin automaatiossa eteenpäin. Toiseen suuntaan kulkeva informaatio koostuu automaatiosta tulevista tehotiedoista, jotka välitetään PLC:lle ja siitä eteenpäin SEAM:in pilvipalveluun.

Automaation tehotiedot koostuvat ilmanvaihtokoneiden reaaliaikaisesta summatehosta, sekä maksimi- ja minimitehosta. Tehotieto saadaan ilmanvaihtokoneiden taajuusmuuntajilta. Maksimi- ja minimiteho ovat kiinteitä, syötettyjä arvoja, jotka saadaan, kun kaikki taajuusmuuntajat otetaan käyttöön ja mitataan se vähimmäisteho, jolla ilmanvaihtokoneita voidaan ajaa lämpötilasäädön vaarantumatta. Vastaavasti maksimiteho, on vakioksi asetettu teho, joka saadaan, kun kaikki ilmanvaihtokoneet vaativat yhteensä käydessään täydellä teholla. Näiden arvojen väliin jää tehon säätövara. Tehotiedot lähetetään palveluun, jotta niitä voidaan tarkastella ja raportoida tarvittaessa, mutta ne eivät vaikuta millään tavalla kysyntäjousto-ohjauksen toteutukseen. Jouston ohjaus lasketaan puhtaasti sähköverkon taajuuteen perustuen.

Alakeskuksille säätöpyyntö (0–100 %) viedään analogiaviestinä ja skaalataan automaattisesti konekohtaisesti. Jos esimerkiksi lämpötilasäätö huomioiden koneen mahdollinen tehoalue on 50–100% sen omasta maksimitehosta, säätöpyyntö 50% antaa taajuusmuuttajan säätölähdöksi 75% koneen maksimitehosta.

Alakeskuksen oma lämpötilasäätö on prioriteetiltaan ensisijainen ohjaava tekijä. Näin ollen koneen teho ei voi laskea alle alakeskuksen ohjeistaman hetkellisen minimitehon. Esimerkkitilanteessa, jossa alakeskuksen lämpötilasäätö vaatii koneen tehoksi vähintään 80% ja PLC:n antama säätöpyyntö vastaisi 70% tehoa, teho asettuu minimissään 80 %:iin. Näin kylmätilojen ja sitä kautta säilytettävien tuotteiden edellyttämät lämpötilavaatimukset eivät vaarannu missään tilanteessa.

6.1.3 Kytkenät

PLC sijaitsee samassa sähkötilassa CPO:n kanssa. PLC kytkeytyy paikalliseen virtuaaliverkkoon Ethernet-kaapelin välityksellä. Yhteys verkosta ulos kulkee tämän verkon palomuurin läpi. Tätä kautta PLC saa yhteyden SEAM:in pilvipalveluun, johon

se lähettää CPO:lta saadut lukemat. Samalla PLC myös vastaanottaa pilvipalvelussa tuotettuja arvoja kysyntäjoustop ohjaamiseksi.

PLC:n ja CPO:n välinen datayhteys muodostetaan modbus-kaapelilla. Yhteys mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonvaihdon laitteiden välillä eli sekä tehotietojen, että ohjaussignaalien välittämisen.

6.2 Pilvipalvelu

Kysyntäjoustop ohjauksen keskeisin osa on SEAM:in pilvipalvelu, jossa lasketaan ohjausarvot FCR-N -säättöön. Samaan palveluun tallennetaan myös ohjattavien koneiden tehoarvot. Pilvipalvelu on verkon yli yhteydessä PLC-yksikköön.

Automaatiosta tuotavat kolme arvoa eli hetkellinen teho sekä minimi- ja maksimitehot siirtyvät pilvipalveluun ja niistä muodostuu palveluun kolme muuttujaa. Jokaisen muuttujan arvo tallennetaan palvelun tietokantaan yhden sekunnin resoluutiolla. Muuttujien historiaa voidaan siis tarkastella niin, että jokaista arvoa vastaa yksi aikaleimarivi joka on muotoa dd.MM.yyy hh:mm:ss, esimerkiksi 01.05.2018 12:35:00.

Järjestelmä kumuloi muuttujista minuutti-, tunti-, kuukausi-, ja vuosiarvot. Kumulointi tapahtuu tyypillisimmin avg- tai sum-funktiolla, eli laskemalla alemman aikatason arvoista keskiarvo tai summa. Esimerkiksi tehoa laskettaessa käytetään luonnollisesti keskiarvoa, jolloin minuuttiarvo on sen sisältämien sekuntien tehotietojen keskiarvo. Vastaavasti vaikkapa energiamäärää laskettaessa käytetään summakumulointia, jolloin ylemmän aikatason arvo saadaan alemman aikatason arvojen summana.

Edellä mainitut automaatiosta tuodut kolme tehotietoa kuuluvat palvelussa ”raskaat muuttujat” -kategoriaan. Raskaat muuttujat tallennetaan kantaan ja jokaista arvoa vastaa yksi aikaleima. Jos muuttujalla ei ole arvoa tietyllä ajanhetkellä esimerkiksi tiedonsiirron keskeytymisen takia, ei kyseiselle aikaleimalle muodosteta arvoa. Edellä mainittujen tehomuuttujien arvot tallennetaan, jotta voidaan todentaa tehon reagointi kysyntäjoustop ohjauspyyntöön sekä raportoida historiatietoja tehon joustosta. Vastaavasti kattavat historiatiedot mahdollistavat myös virhetarkastelun.

Kantaan tallennettuja arvoja voidaan tarkastella hakemalla haluttua muuttujaa sekä taltiota. Muistitilan käytön rajaamiseksi kullekin taltiolla on asetettu säilytysaika, jota vanhemmat arvot poistetaan järjestelmästä. Tätä vanhempia arvoja ei ole mahdollista tarkastella. Taltioiden säilytysajat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2 Raskaiden taltioiden säilytysajat

Taltio	Säilytysaika	Säilytysajan yksikkö
Sekunti	50	d
Minuutti	370	d
Tunti	60	M
Päivä	5	a
Kuukausi	5	a
Vuosi	5	a

6.2.1 Yleiset ohjausmuuttujat

Kysyntäjouaston ohjaamisen tarvittavat laskelmat on tallennettu pilvipalveluun. Käytännössä alkuarvoista muodostetaan laskentamuuttujia, joiden muodostaman laskennan perusteella luodaan lopulta kaksi ohjausmuuttujaa lähetettäväksi takaisin PLC-laitteelle. Ohjausmuuttujien laskennan alkuarvoina käytetään verkon taajuusmittausta ja siitä johdettuja tietoja sekä tietoja markkinalle annettujen tarjousten pohjalta syntyneistä kaupoista.

Kohteena oleva kysyntäjoustokuorma asetetaan osaksi Fingridin taajuusohjattua käyttöreserviä (FCR-N). Näin ollen jouaston toteutus määräytyy sähköverkon taajuuden perusteella. Sähköverkon taajuus mitataan SEAM:in kehittämällä mittalaitteella. Mittaus tapahtuu Synchron Tech:in tiloissa. Itse mittaus perustuu taajuuden yksittäisen aallonpituuden analyysiin vertaamalla sitä referenssinä käytettävän erittäin nopeasti värähtelevän kiteen värähdysten määrään yhden taajuuden aallonpituuden aikana. Mittalaitteen tulosta on verrattu Fingridin vastaaviin mittauksiin ja todettu sen olevan erittäin tarkka.

FCR-N -markkinoille tehdään tarjouksia tunnin resoluutiolla. Tarjous on jätettävä tarjouksen kohdetuntia edeltävänä päivänä kello 18:30 mennessä. Tarjouksessa määritellään teho, joka ollaan valmiita toteuttamaan säätönä. Minimitarjouskoko on 0,1 MW, joka on määritelty siten, että tämän verran tehoa on kyettävä säätämään kumpaankin suuntaan. Tehoalueeksi, jolla säätöä tapahtuu, tulee näin minimissään 0,2 MW. Jos kauppa syntyy ja tarjous säätökapasiteetista hyväksytään, on kyseisellä tunnilla velvoitettu suorittamaan säätöä verkon taajuuden mukaisesti. Mikäli tarjousta ei hyväksytä ei säätöä luonnollisestikaan tarvitse tehdä. Tarjous voidaan myös hyväksyä osittain, eli tehosäätöä on velvoitettu tekemään sen tehon osalta, josta kauppa on syntynyt.

Kuten luvussa aiemmin todettiin, taajuusohjattu käyttöreservi pyrkii pitämään verkon taajuuden normaalilla vaihteluvälillä 49,9...50,1 Hz. Käytännössä säätö on asetettu aktivoitumaan jo 49,95 ja 50,05 Hz kohdalla eli taajuuspoikkeaman ollessa 0,05 Hz. Maksimitehonsäätö aktivoituu Fingridin vaatimuksen mukaisesti taajuuspoikkeamalla 0,1 Hz.

Laitteiston määrittelyn mukaisesti ohjausarvo on konfiguroitava niin, että ohjaus perustilaan tapahtuu arvolla 50. Vastaavasti pyyntö tehon maksimilisäykselle tapahtuu arvolla 0 ja pyyntö maksimipudotukselle arvolla 100. Jakauma on lineaarinen, joten taajuussäädön käynnistyessä – joko taajuudella 50,05 tai 49,95 – on ohjausarvon oltava jompaankumpaan tapahtuva säädön puolivälissä eli joko 25 tai 75. Kun taajuus säädön aktivoitumisen jälkeen palaa kohti 50 Hz:ä, muuttuu ohjausarvokin kohti 50:ä. Kun perustaajuus 50 Hz ja ohjausarvo 50 saavutetaan, säilyy ohjausarvo tässä lukemassa, kunnes taajuuspoikkeama on jälleen suurempi kuin 0,05 Hz.

Laskennan alkuarvoina käytetään kolmea taajuuteen perustuvaa muuttujaa, sekä säätökaupan tehotietoa. Nämä arvot on tuotu palveluun eri rajapintojen kautta tai ne muodostuvat automaattisesti näiden tuotujen arvojen perusteella.

Ensimmäinen muuttuja on FREQUENCY, joka ilmoittaa sähköverkon taajuuden hertseinä. Taajuus saadaan edellä mainitulla mittauslaitteistolla ja se siirtyy automaattisesti palveluun.

Seuraava muuttuja on FQ_OVER, jonka tieto perustuu taajuuden muutoksiin ja ottaa lisäksi huomioon FCR-N -jouston määrittäen. Kyseinen binäärimuuttuja aktivoituu (=1) kun verkon taajuus kasvaa yli 50,05 Hz:n ja deaktivoituu (=0) kun verkon taajuus saavuttaa jälleen 50 Hz:n perustaajuuden.

FQ_UNDER Binäärimuuttuja joka toimii samalla logiikalla kuin FQ_OVER, mutta ohjaa säätövelvoitetta, kun taajuus on liian pieni. Se aktivoituu (=1) kun verkon taajuus laskee alle 49,95 Hz:n ja deaktivoituu (=0), kun taajuus saavuttaa 50 Hz:n perustaajuuden. Näillä muuttujilla voidaan siten yksiselitteisesti määrittää milloin ja mihin suuntaan joustoa tulee toteuttaa mikäli joustovelvoite on päällä.

Verkon taajuuteen perustuvien tietojen lisäksi järjestelmässä tarvitaan tieto Fingridille FCR-N -markkinalla tehdyn tarjouksen läpimenosta. Tarjoukset tehdään Fingridin ylläpitämän Vaksi-sovelluksen kautta. Kun seuraavalle päivälle annetuille tarjouksille saadaan toteumat, siirtyvät ne automaattisesti pilvipalveluun muuttujalle FI.FG.PF.RESKAUPAT.P. Muuttuja kertoo millä teholla kysyntäjoustokapasiteettia kullekin tunnille on saatu kaupaksi. Tunteina, joille kauppa on tehty, muuttuja saa arvoksi kaupankäynnin mukaisen tehon ja muina tunteina arvon 0. Arvot tallennetaan tuntitallioon.

Seuraavana on esitelty taajuusohjattua kysyntäjoustoa varten muodostetut laskennat. Toisin kuin edellä mainituilla raskailla muuttujilla, jotka eivät sisällä valmista yhtälöä järjestelmään, niistä johdetuilla muuttujilla on aina lauseke, jonka perusteella niiden arvo määräytyy. Lauseke voi sisältää mitä tahansa muita muuttujia, laskuoperaattoreita sekä funktioita.

Muuttujien laskennan määrittely noudattaa esimerkiksi Excel-taulukkolaskennasta tunnettua notaatiota. Yhtälö alkaa yhtäsuuruusmerkillä (=), jonka jälkeen seuraa laskentayhtälö. Yleisten laskentamerkkien lisäksi on mahdollista käyttää erilaisia funktioita sekä muodostaa ehtolauseita. Ehtolauseissa käytetään Java-kielen mukaisia vertailuoperaattoreita. Tämän työn muuttujien laskennoissa käytettävät vertailuoperaattorit on esitetty taulukossa 3. Ehtolause muodostetaan antamalla ehto, jonka jäljessä on kysymysmerkki. Tämän jälkeen seuraa arvo ehdon ollessa tosi sekä

kaksoispisteen jälkeen arvo ehdon ollessa epätosi. Lisäksi dollarimerkkiä (\$) käytetään kun laskennassa viitataan toiseen muuttujaan.

Taulukko 3 Käytetyt vertailuoperaattorit

Operaattori	Selite
==	Yhtä suuri kuin
<	Pienempi kuin
>	Suurempi kuin
&&	Ja

Ensiksi lasketaan yleiset taajuuspoikkeamaan liittyvät arvot. Nämä muuttujat eivät ole kohdespesifejä eli niitä voidaan käyttää eri kohteiden taajuusohjauksen apumuuttujina, joiden avulla määritetään tietyn kohteen automaation tarvitsemat arvot. Taajuuspoikkeamaa mittaavat generiset muuttujat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4 Taajuuspoikkeaman perusteella laskettavat muuttujat

Tunnus	Lauseke	Yksikkö	Selite
FQ_PLUSDELTA	$=(\$FREQUENCY < 50) ? 0 : ((\$FREQUENCY > 50.1) ? 0.1 : \$FREQUENCY - 50)$	Hz	Positiivinen taajuuspoikkeama (0 - 0.1 Hz)
FQ_MIINUSDELTA	$=(\$FREQUENCY > 50) ? 0 : ((\$FREQUENCY < 49.9) ? 0.1 : 50 - \$FREQUENCY)$	Hz	Negatiivinen taajuuspoikkeama (0 - 0.1 Hz)
EAM.FILOAD.FCRN.CTRL. P_PERCENT.UP	$=\$FQ_UNDER == \$FQ_OVER ? 0 : \$FQ_OVER * \$FQ_PLUSDELTA / 0.1 * 100$	%	FCR-N, ohjaus tehon nostoon (0 - 100 %)
EAM.FILOAD.FCRN.CTRL. P_PERCENT.DOWN	$=\$FQ_OVER == \$FQ_UNDER ? 0 : \$FQ_UNDER * \$FQ_MIINUSDELTA / 0.1 * 100$	%	FCR-N, ohjaus tehon laskuun (0 - 100 %)

Positiiviselle ja negatiiviselle taajuuspoikkeamalle on omat muuttujansa. Muuttujat antavat arvot taajuuspoikkeamille 0,1 Hz asti. Tätä suurempi poikkeama ei kasvata muuttujan arvoa, koska FCR-N:n mukainen säätövelvoite saavuttaa maksiminsa eikä muutu tästä arvosta eteenpäin. Molemmat muuttujat koostuvat kahdesta ehtolauseesta.

Positiivisen taajuuspoikkeaman muuttuja tarkistaa ensin, onko taajuus (FREQUENCY) alle 50 Hz. Jos ehto on tosi, saa muuttuja arvon nolla, koska taajuuspoikkeamaa ei ole, tai se on negatiivinen:

$$FQ_PLUSDELTA = (\$FREQUENCY < 50)?0$$

Jos ehto on epätosi, tarkistetaan, onko taajuus yli 50,1 Hz. Jos tämä ehto on tosi, saa muuttuja maksimiarvonsa 0,1. Muussa tapauksessa muuttujan arvo on verkon taajuus, joka tässä tilanteessa on siis 50,0...50,1 (Hz), vähennettynä luvulla 50. Tällöin muuttujan arvo on välillä 0,0...0,1.

$$FQ_PLUSDELTA = (\$FREQUENCY < 50)?0$$

$$((\$FREQUENCY > 50.1)? 0.1 : \$FREQUENCY - 50)$$

Negatiivinen taajuuspoikkeama lasketaan samalla periaatteella kuin positiivinen. Ensiksi tarkistetaan, onko taajuus yli 50 Hz, jolloin negatiivista poikkeamaa ei ole. Seuraavaksi onko taajuus 0,1 Hz poikkeaman vaatima alle 49,9 Hz. Mikäli verkon taajuus on jotain tältä väliltä, on muuttujan arvo 50 vähennettynä taajuuden arvolla.

$$FQ_MIINUSDELTA = (\$FREQUENCY < 50)?0$$

$$((\$FREQUENCY > 50.1)? 0.1 : \$FREQUENCY - 50)$$

Taajuuspoikkeaman muuttaminen taajuusohjatun käyttöreservin määrittelemäksi ohjauksäädöksi tapahtuu kahdella muuttujalla, jotka antavat taajuuspoikkeamasta prosenttiarvon. Ei säätötarvetta vastaa arvoa 0 ja täysi säätötarve arvoa 100.

Ohjauksen määrittelyn lisäksi muuttujissa tehdään virheetarkastus siltä varalta, että palvelu antaa tietoliikennehäiriön tai jonkin muun syyn takia virheelliset arvot ylös- ja alaspäin tapahtuville joustoille. Käytännössä muuttuja tarkistaa, ovatko molemmat ohjausbinäärit ole yhtä suuret. Tällä valvotaan, etteivät ylös- ja alassäätö ole samaan aikaan aktiivisia. Jos näin olisi, antaa muuttuja arvon nolla, eli ohjauspyyntöä ei anneta eteenpäin. Tämä toimenpide estää virheellisten ohjausmuuttujien muodostumisen. Tämä on erityisen tärkeää, sillä näitä muuttujia käytetään useisiin eri kohteisiin muodostettavien ohjaussignaalien pohjana. Vastaavasti täysin normaalissa tapauksessa eli molempien binäärien arvon ollessa nolla saavat muuttujat arvon nolla.

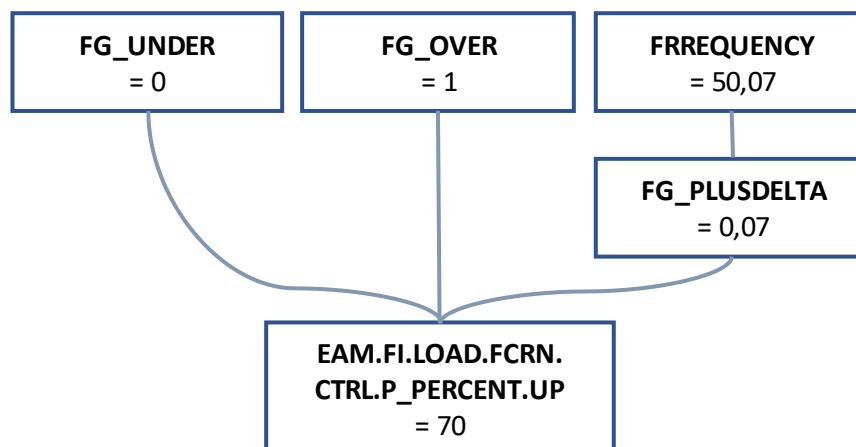
$\$FQ_UNDER == \$FQ_OVER ? 0 :$

Mikäli positiivisen ja negatiivisen taajuuspoikkeaman ohjausbinäärit (FQ_OVER ja FQ_UNDER) ja ovat erisuuret, on säätösignaali johonkin suuntaan voimassa. Tällöin muuttujat saavat arvot kertomalla muuttujan mukainen binääri lasketulla taajuuspoikkeamalla ja antamalla sille kerroin. Positiivisen taajuuspoikkeaman ohjausmuuttuja käyttää kertolaskuun positiivista taajuuspoikkeamaa (FQ_PLUSDELTA) sekä sitä vastaavaa binääriä (FQ_OVER). Mikäli taajuuspoikkeama onkin negatiivinen, tuottaa kertolasku arvon nolla.

$\$FQ_UNDER == \$FQ_OVER ? 0 :$

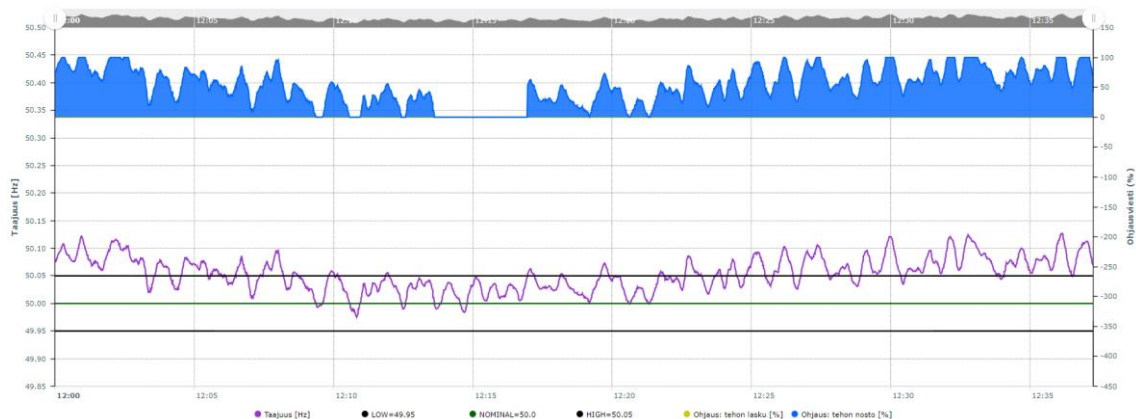
$\$FQ_OVER * \$FQ_PLUSDELTA / 0.1 * 100$

Muuttujaparista toinen käyttää vastaavia negatiivisen taajuuspoikkeaman muuttujia (FQ_UNDER ja FQ_MIINUSDELTA). Lopputuloksena molemmilla muuttujilla on joka hetki arvo väliltä 0...100 niin, että vain toinen muuttujista voi olla samalla aikaleimalla erisuuri kuin nolla. Muuttujaketjua on havainnollistettu kuvassa 15, jossa on annettu esimerkkitilanne tehon nostolle. Laskuketju tehon laskulle toimii vastaavalla periaatteella.



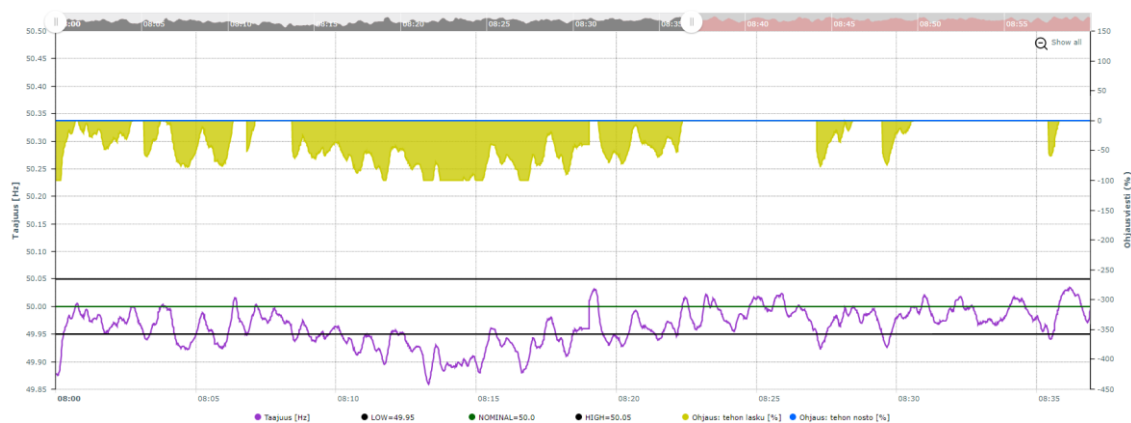
Kuva 15 Esimerkkitalanne, kun tehon nosto on aktiivinen

Nyt muodostettujen muuttujien toimintaa on havainnollistettu kuvissa 16 ja 17. Kuvista nähdään taajuuden muutoksen ja tehon laskun sekä tehon noston korrelaatio.



Kuva 16 Verkon taajuus ja sen perusteella määräytyvä ohjauksen nostolle.

Tehon nostoa ohjaavassa kuvaajassa nähdään sinisenä alueena tehon noston suhteellinen määrä. Tehon nosto aktivoituu, kun taajuus kasvaa yli 50,05 Hz ja saa maksimiarvonsa taajuuden ollessa 50,1 Hz. Sääto pysyy aktiivisena kunnes taajuuskäyrä palaa perustaajuuteen. Seuraavassa kuvassa esitetään päinvastaisen tilanne, jossa tehon lasku on kuvattu keltaisella alueella.



Kuva 17 Verkon taajuus ja sen perusteella määräytyvä ohjauksen laskulle.

Järjestelmään tuodaan tuntitason tieto siitä, kuinka suurella teholla markkinoille on saatu tehtyä kauppaa. Luodaan tämän pohjalta muuttuja, joka kertoo ainoastaan sen onko kauppaa tehty ollenkaan vai ei. Uusi muuttuja FCRN_TRADE_ON kertoo onko kyseiselle tunnille tehty kauppaa säätötehosta joko koko tarjotun tehon osalta tai osalle siitä.

$$\text{FCRN_TRADE_ON} = \$\text{FI.FG.RESKAUPAT.P} > 0 ? 1 : 0$$

Mikäli tarjous on hyväksytty, eli myyty teho on suurempi kuin nolla, saa muuttuja arvon 1. Muussa tapauksessa arvo on nolla. Tätä muuttujaa käytetään myöhemmässä laskennassa, kun halutaan tietää, onko säätövelvoite olemassa vai ei. Samalla asetetaan järjestelmä käyttämään muuttujalle hetkellistaltiota, jolloin arvo lasketaan aina kuluvan tunnin kauppatedon perusteella. Tämä yksinkertaistaa myöhemmin tehtäviä laskentoja.

Tähän asti muodostetuilla ja lasketuilla muuttujilla voidaan pilvipalvelussa määrittää joka hetki verkon taajuus, taajuusohjatun käyttöreservin mukainen ohjaustarve tehon nostolle tai pudotukselle, taajuuspoikkeaman absoluuttinen määrä säätöalueella, ohjaustarpeen suhteellinen suuruus sekä läpimenneet tarjoukset ja niiden suuruus tunneittain. Nämä tiedot ovat tarpeellisia jokaisen FCR-N:nä hyödyntävät kohteen tai projektin osalta. Koska kohteiden logiikat ohjausarvojen syötön osalta vaihtelevat, muodostetaan näiden alkumuuttujien pohjalta tapauskohtaisesti tarvittavat muuttujat kuhunkin tilanteeseen.

6.2.2 Kohdespesifit ohjausmuuttujat

Projektin kohteena oleva kylmälaitteiden kysyntäjoustop automaatio vaatii ohjausarvon olevan välillä 0...100, johon sisältyy joustop koko skaala täydestä tehon lisäyksestä täyteen tehon vähennykseen. Joustop ollessa käynnissä sen suunta selviää ohjausarvon perusteella. Nämä muuttujat muodostetaan edellä esitettyjen perusmuuttujien avulla.

Muodostetaan ensiksi automaatiologiikkaan lähetettävä säätövelvoitteen binääri. Muuttujalla tarkistetaan onko markkinoiden mukainen säätövelvoite voimassa. Koska ehto on sama kuin edellä luodulla muuttujalla, ei siihen tarvita muutoksia. Muuttujan nimeksi asetetaan CPO-laitteeseen kirjoitettavan muuttujan osoite.

$$\text{COIL2} = \$\text{FCRN_TRADE_ON}$$

Kohteessa oleva logiikka lukee tätä arvoa ja mikäli se on 1, ohjaa se tehoa seuraavaksi määriteltävän taajuusohjautuvan muuttujan mukaisesti. Mikäli arvo on 0, ei ohjausta tehdä, koska hyväksyttyä tarjousta ei kyseiselle hetkelle ole.

Lasketaan seuravaksi taajuuspoikkeamasta riippuva ylös- tai alassäätöpyynnön arvo. Mikäli sääntövelvoitetta ei ole, on muuttujan annettava arvo 50, mikä tarkoittaa, ettei tehoa pyritä lisäämään eikä vähentämään.

Ensiksi tarkistetaan ylös- ja alassäätövelvoitteiden binäärit. Mikäli molemmat ovat samat, ei säätövelvoitetta ole tai kyseessä on virhetilanne, koska säätövelvoite ei voi olla voimassa molempiin suuntiin yhtä aikaa. Molemmissa tapauksissa binääri saa arvon 50.

$$\text{HREG1} = \$\text{FQ}_{\text{UNDER}} == \$\text{FQ}_{\text{OVER}} ? 50 :$$

Muuttujan ei ole tarpeen antaa ohjausvelvoitetta, mikäli taajuus on laskennallisesti niin lähellä perustaajuutta, ettei käytännön hyötyä säätövelvoitteelle ole. Valitaan tarkkuudeksi kolme desimaalia. Mikäli muuttujan kaksi ensimmäistä ehtoa eivät täyty, on ohjausvelvoite voimassa ja lisäksi taajuusohjaus käynnissä..

$$\begin{aligned} \text{HREG1} &= \$\text{FQ}_{\text{UNDER}} == \$\text{FQ}_{\text{OVER}} ? 50 : \\ &\$ \text{FREQUENCY} < 50.001 \ \&\& \ \$ \text{FREQUENCY} > 49.999 ? 50 : \end{aligned}$$

Seuraavaksi määritetään ohjausarvo, mikäli ohjaus on käynnissä. Velvoite ylössäätöön eli kulutuksessa tehon pienentämiseen antaa arvon joka on suurempi kuin 50. Täysi tehon vähennys on ohjeistettava taajuuden saavuttaessa 49,9 Hz. Tällöin muuttujan arvoksi asetetaan 100. Käytetään hyväksi aiemmin laskettuja FCR-N -säädön prosenttiarvoja. Lasketaan ylössäädön arvo lisäämällä lähtölukuun 50 säädön prosenttiarvo jaettuna kahdella. Näin maksimiarvoksi muodostuu $50 + 100/2 = 100$. Taajuuden ollessa 50,05 Hz on arvo 75 ja lähestyttäessä perustaajuutta lähestyy muuttuja arvoa 50.

$$\begin{aligned} \text{HREG1} &= \$\text{FQ}_{\text{UNDER}} == \$\text{FQ}_{\text{OVER}} ? 50 : \\ &(\$ \text{FREQUENCY} < 50.001 \ \&\& \ \$ \text{FREQUENCY} > 49.999 ? 50 : \\ &(\$ \text{FQ}_{\text{UNDER}} == 1.0 ? \\ &\$ \text{FQ}_{\text{UNDER}} * (50 + \$ \text{EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.DOWN}/2))) : \end{aligned}$$

Alassäädölle eli kulutuksen tehon nostolle muodostetaan vastaava laskenta, mutta yhteenlaskun sijaan vähennetään arvosta 50 säätövelvoitteen prosenttiarvo. Näin alassäätötilanteessa on ohjausarvo välillä 0...50.

$$\begin{aligned} \text{HREG1} &= \$\text{FQ}_{\text{UNDER}} == \$\text{FQ}_{\text{OVER}} ? 50 : \\ &(\$ \text{FREQUENCY} < 50.001 \ \&\& \ \$ \text{FREQUENCY} > 49.999 ? 50 : \\ &(\$ \text{FQ}_{\text{UNDER}} == 1.0 ? \\ &\$ \text{FQ}_{\text{UNDER}} * (50 + \$ \text{EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.DOWN}/2): \\ &\$ \text{FQ}_{\text{OVER}} * (50 - \$ \text{EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.UP}/2))) \end{aligned}$$

Lasketut ohjausmuuttujat on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5 Kysyntäjoustop ohjausmuuttujat

Tunnus	Lauseke	Selite
COIL2	=FCRN_TRADE_ON	Tehosäädön binääri (1 = ON, 0 = OFF)
HREG1	=FQ_UNDER == FQ_OVER? 50 : (\$FREQUENCY < 50.001 && \$FREQUENCY > 49.999 ? 50 : (\$FQ_UNDER == 1.0 ? \$FQ_UNDER *(50+\$EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.DOWN /2) : \$FQ_OVER *(50-\$EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.UP /2)))	Ohjaus tehon säätöön (0 – 100)

Nyt käsiteltyjen muuttujien avulla voidaan toteuttaa kysyntäjoustop ohjaus kokonaisuudessaan. Täsmälliset käytännön ohjeet konfiguroinnille SyncPower-ohjelmistossa on esitetty luvussa 7.

7 OHJE FCR-N -KOHTEN OHJAUKSEN KONFIGUROINTIIN

Tässä luvussa annetaan ohje uuden FCR-N -kohteen ohjauksen muodostamiseen. Esimerkkinä on käytetty Nurmon Auringon kysyntäjoustop ohjausta. Kohteesta riippuen laskelmien sisältö voi vaihdella, mutta muuten ohje pyrkii kuvaamaan konfiguroinnin mahdollisimman hyvin niin, että samaa periaatetta noudattamalla voi sujuvasti muodostaa uuden ohjauskohteen.

Ohjeessa ei oteta kantaa tiedonsiirtoprotokollaan palvelun ja kohteen välillä, sillä se on tapauskohtainen sekä mahdollisesti ohjelmointia vaativa. Nämä tekijät ovat riippuvaisia myös muiden osapuolten ohjausjärjestelmistä ja niiden liittymistä.

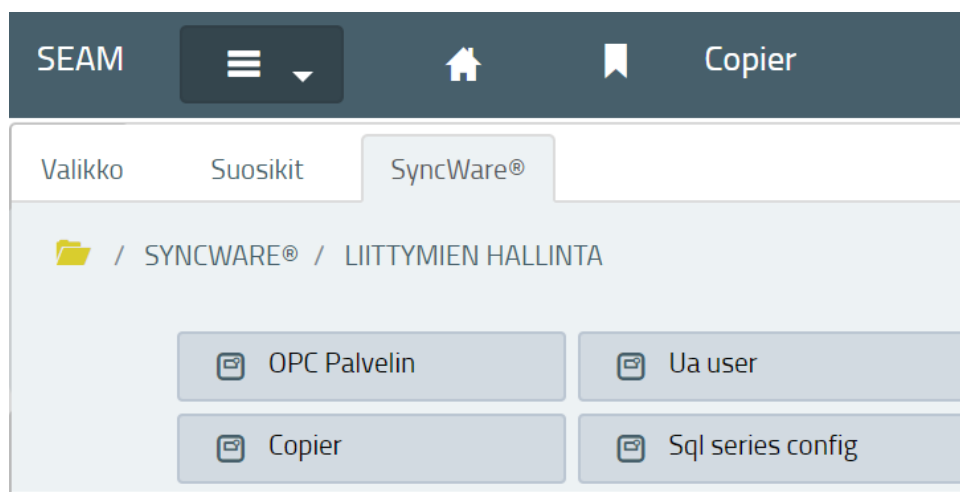
Ennen muita toimenpiteitä tulee olla käsitys laskuperiaatteista, joilla saadaan muodostettua kohteen taajuusohjauksen ohjeet. Näiden laskelmien alkuarvoina voidaan SEAM:in pilvipalvelussa käyttää valmiita taajuuteen perustuvia laskentoja, jotka on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6 Sähköverkon taajuuteen perustuvat muuttujat

Muuttuja	Selite
FREQUENCY	Taajuus
FQ_OVER	Alassäätötila
FQ_UNDER	Ylössäätötila
FQ_PLUSDELTA	Taajuuspoikkeama ylös (0-1 Hz)
FQ_MIINUSDELTA	Taajuuspoikkeama alas (0-1 Hz)
EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.UP	Taajuuspoikkeama ylös (0-100%)
EAM.FI.LOAD.FCRN.CTRL.P_PERCENT.DOWN	Taajuuspoikkeama alas (0 - 100%)
FI.FG.RESKAUPAT.P	Tunnille myyty säätötehon määrä
FCRN_TRADE_ON	Säätökaupan tilatieto tunnille (0/1)

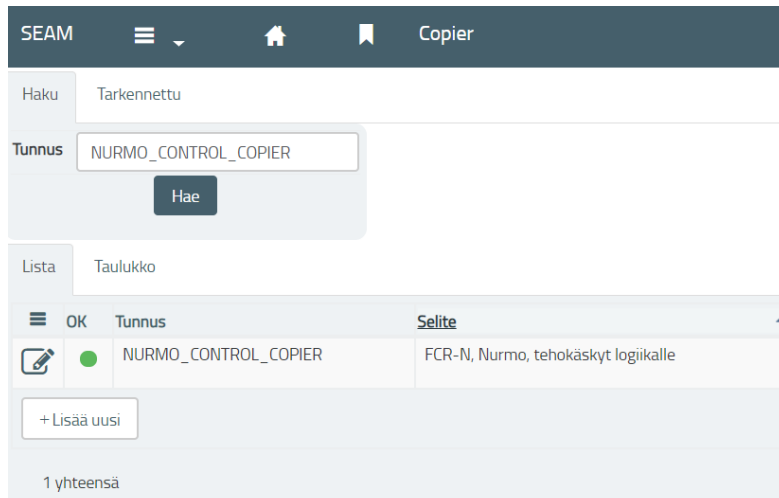
Ohjauksen muodostaminen aloitetaan luomalla kohteen omat ohjausmuuttujat copier-toiminnolla. Copier suorittaa annettuja laskelmia erikseen määritettävien aikavälein. Copierin hyötynä on nimenomaan se, että muuttujien laskenta voidaan ajastaa halutusti. Lisäksi saman copier-ryhmän alla olevat laskennat tarpeen mukaan voidaan pysäyttää tai uudelleenkäynnistää kerralla.

Siirry copier-sivulle valikosta alla olevan kuvan 18 mukaisesti: Päävalikko/SyncWare/Liittymien hallinta/Copier. Aloita uuden copierin lisääminen ”lisää uusi”- painikkeesta. Kun copier on luotu, se löytyy valikosta hakemalla.



Kuva 18 Navigointi Copier-hallintasivulle

Copier-hallintasivulla on nähtävissä kaikki kyseisen palvelun copier-toiminnot. Lista aukeaa automaattisesti näyttöön kun sivu aukaistaan. Kohteita voi myös hakea eri hakuehdoilla sekä muokata tarvittaessa. Näkymä on kuvan 19 mukainen.



Kuva 19 Copier -hallintasivu

Uuteen copieriin tulee täyttää tarvittavat kentät kuvan 20 mukaisesti. ”Muuttujan tunnus” kenttään tulee kirjoittaa nimi, jolla copieriin halutaan viitattavan muualla järjestelmässä. ”Selite”-sarakkeeseen annetaan vapaamuotoinen kuvaus copierin tarkoituksesta. ”Käytössä”-valinta kannattaa jättää valitsematta ennen kuin copierin muuttujat ovat valmiina. Näin varmistetaan, ettei copier laske muuttujia ennen kuin on tarve. Muita kenttiä ei ole tarpeen täyttää. Uusi copier luodaan lopuksi ”Tallenna”-painikkeesta.

The image shows a configuration window for a copier. At the top, there are tabs for 'OK', 'Tunnus', and 'Selite'. Below this, the current configuration is shown: 'NURMO_CONTROL_COPIER' with the description 'FCR-N, Nurmo, tehokäskyt logiikalle'. The main area is titled 'Muokkaus' and 'Lisätietoja'. It contains several input fields and checkboxes:

- Time begin offset: 0
- Time end offset: 0
- Time save offset: 0
- Käytä nykyistä aikaa:
- Kopioi kaikki:
- Skip null values:
- Next copy time: [empty field]
- Resol.yksikkö: [empty field]
- Resoluutio: [empty field]
- Empty period is valid:
- Tunnus: NURMO_CONTROL_COPIER
- Selite: FCR-N, Nurmo, tehokäskyt logiikalle
- Valmistaja: [empty field]
- Malli: [empty field]
- Käytössä:
- Yhteys: [empty field]
- Järkevyyssmaksimi: [empty field]
- Järkevyyssminimi: [empty field]
- Kyselyjakso: [empty field] s
- Poll schedule: [empty field]
- Taltionimet: [empty field]
- Signal generator mode: [empty dropdown]
- Respect manual:
- Virheilmoitus: [empty field]

At the bottom, there are buttons: 'Tallenna', 'Kopioi', 'Poista...', 'Peruuta', and 'Oletusarvot'.

Kuva 20 Copierin muokkausvalikko

Copieriin muuttujat lisätään ”Copier muuttujat” -sivulla avaamalla halutun copierin muokkaustila ja valitsemalla alavalikosta ”Copy variable”. Valikko on kuvan 21 mukainen. Muokkaustila avautuu listalta copierin viereisestä kuvakkeesta.

Laite	Muuttujan tunnus	Selite	Ei käytössä
NURMO_CONTROL_COPIER	COIL2@NURMOWRITE.REMOTE	NURMO Ohaus: Tehosäädön binaari (1 = ON, 0 = OFF)	<input type="checkbox"/>
NURMO_CONTROL_COPIER	HREG1@NURMOWRITE.REMOTE	NURMO Ohjaus: ohjaus tehon säätöön	<input type="checkbox"/>

+ Lisää uusi

2 yhteensä

Kuva 21 Copier muuttujat

Copy variable -sivulla luodaan tarvittavat ohjausmuuttujat. Muuttujan saa lisättyä ”Lisää uusi” -painikkeesta. Muuttujien nimeäminen voi riippua kohteen tiedonsiirtoon liittyvästä määrittelystä. Esimerkki muuttujista on nähtävissä kuvassa 22.

Kuva 22 Esimerkki copier-muuttujista. Säätövelvoitteen päälläolo ja säätöarvo

Muuttujan ominaisuuksilla määritellään sen toiminta. Muuttujalle annettavat ominaisuudet on selitetty taulukossa 7.

Taulukko 7 Copier-muuttujan ominaisuudet

Kenttä	Selite
Laite	Muuttujaa laskevan copierin nimi
Lauseke	Muuttujan yhtälö
Muuttujan tunnus	Muuttuja nimi, sekä taltio, jolle muuttujaa talletetaan
Selite	Vapaamuotoinen kuvaus muuttujan tarkoituksesta
Järkevyysminimi	Arvo, jota pienempiä arvoja ei talleteta.
Järkevyysmaksimi	Arvo, jota suurempia arvoja ei talleteta
Ei käytössä	Valittuna estää copieria käyttämästä muuttujaa

Aikalistatoiminnolla voidaan asettaa copier suorittamaan laskenta halutuin aikaväleihin. Joka laskentakerralla muuttujat saavat uudet arvot yhtälöidensä mukaisesti. Sovelluksessa, jonka on tarkoitus toimia pienellä aikaresoluutiolla -käytännössä reaaliajassa- laskentojen aikaväli tulee asettaa tarpeeksi lyhyeksi, esimerkiksi kerran sekunnissa tai kahdessa sekunnissa.

Aikalistojen hallintaan siirrytään palvelussa seuraavasti: Päävalikko/SyncWare/Järjestelmän hallinta/Aikalista. Valikko on kuvan 23 mukainen. Valikossa voi tarkastella olemassa olevia aikalistoja. Uuden aikalistan luonti aloitetaan ”Lisää uusi” -painikkeesta.

SEAM
Aikalista

Haku
Tarkennettu

Selite

Luokan nimi

Parametrit

Ei käytössä
 Kyllä
 Ei
 Kumpi tahansa

Edellinen ajo

-

Hae
Oletusarvot

Lista
Taulukko

	OK	Selite	s	min	t	kpv	kk	vpv	Luokan nimi
	●	FCR-N ohjaus, Nurmon Aurinko	*/2						syncrontech.device.Poll

+ Lisää uusi

1 yhteensä

Kuva 23 Aikalista-hallintasivu

Aikalistan ominaisuudet on nähtävissä kuvassa 24. Tässä yhteydessä olennaiset tekijät ovat Selite, laskennan aikamäärittelyt (kentät s, min, t, kpv, kk ja vpv) sekä Parametrit. Näihin kenttien sisältö on selitetty taulukossa 8.

Muokkaus
🏠 ↗

Selite

s

min

t

kpv

kk

vpv

Luokan nimi

Ei käytössä

Edellinen ajo 24.8.2018 12:41

Edellisen ajon kesto 0,182 s

Käytä UTC-aikaa

Tuntien lisäys aloitusaikaan

Virheilmoitus

Säikeiden maksimimäärä

Klusteriryhmä

Aja tunnuksilla

Lokitulostus

Parametrit

Tallenna
Kopioi
Poista...
Peruuta
Oletusarvot

Kuva 24 Aikalistan muokkausvalikko

Automaattisesti täytetyt kentät jätetään oletusmäärityksille. Näitä kenttiä ovat Luokan nimi, Säikeiden maksimimäärä sekä Lokitulostus. Tämän lisäksi ne tyhjät kentät, joihin ei tämän ohjeen perusteella tehdä muutoksia, jätetään tyhjäksi.

Taulukko 8 Aikalistan ominaisuudet. Taulukossa on esitetty vain tämän tehtävän kannalta olennaiset kentät

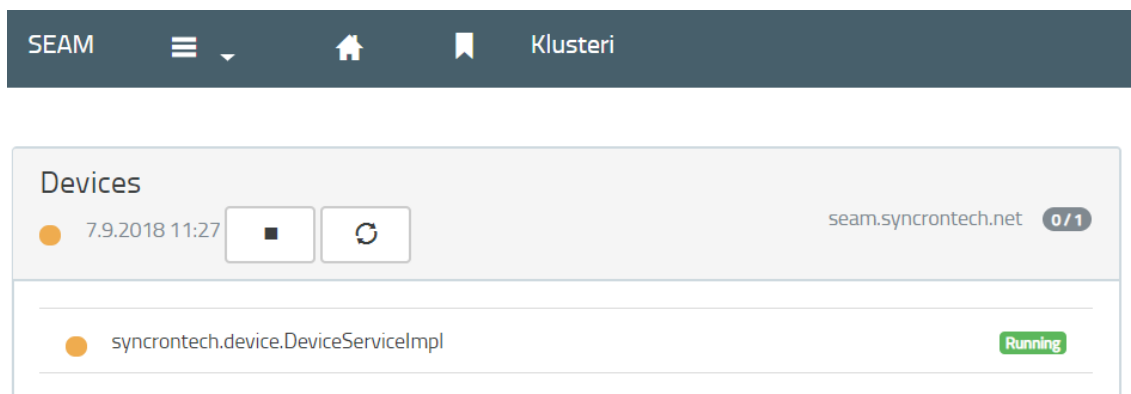
Kenttä	Selite
Selite	Vapaamuotoinen kuvaus aikalistan tarkoituksesta.
Laskennan resoluutio (s, min, t kpv, kk, vpv)	Ajanhetket, joilla laskenta suoritetaan. Esim. asettamalla min-sarakkeeseen arvon 0, suoritetaan toiminto, kun systeemikellon minuuttiarvo on nolla (eli joka tunnin alussa). Esimerkissä laskenta suoritetaan joka toinen sekunti.
Parametrit	Aikalistan parametointi. Jos ajetaan copieria, parametrinä on copierin nimi.

Kun aikalistaa tai copieria on muutettu ja muutokset halutaan käyttöön, on niitä säätelevä device-toiminto käynnistettävä uudelleen. Tämän voi suorittaa Copier-sivulla avaamalla copierin muokkauspaneelin ja valitsemalla alimpana olevasta valikosta ”Käynnistä uudelleen” -toiminto kuvan 25 mukaisesti.

The screenshot shows a configuration panel for a copier. At the top, there are buttons for 'Tallenna', 'Kopioi', 'Poista...', 'Peruuta', and 'Oletusarvot'. Below these is a 'Copy variable →' button. The main configuration area has two dropdown menus: 'Aikalista' with the value 'FCR-N ohjaus, Nurmon Aurinko' and 'Klusteriryhmä' with the value 'Devices=ERRrr'. At the bottom of this area is a green button with a circular arrow icon and the text 'Käynnistä uudelleen'.

Kuva 25 Uudelleenkäynnistys copierin muokkausvalikossa

Vaihtoehtoisesti uudelleenkäynnistystä voi tehdä klusteri-sivulta etsimällä valittavista toiminnoista devices ja suorittamalla uudelleenkäynnistystä kuvan 26 mukaisesti.



Kuva 26 Devices-toiminto klusterissa. Uudelleenkäynnistys tapahtuu päivitysmerkistä.

Uudelleenkäynnistys on suoritettava myös, jos edellä mainittuihin toimintoihin joudutaan myöhemmin tekemään muutoksia. Uudelleenkäynnistykseen jälkeen on suotavaa tarkistaa copier- ja aikalistasivuilta, että muutetut toiminnot ovat aktiivisia. Tästä kertoo vihreä statusmerkki valitun kohteen vieressä. Mikäli status on oranssi, on toiminto kunnossa, mutta tietoa ei ole vielä vastaanotettu. Tämä on normaalia, mikäli aikalistan ajo on ajastettu niin, ettei sitä ole vielä tapahtunut uudelleenkäynnistykseen jälkeen. Punainen status tarkoittaa virhettä, eli tietoa ei ole voitu tallettaa. Tämä voi johtua esimerkiksi määrittelyvirheestä parametrejä annettaessa. Harmaa status tarkoittaa, että liittymä on kytketty pois käytöstä. Kytkeä päälle tai pois suoritetaan kohteen muokkauspaneelistä.

Testausvaiheessa tulee vielä tarkistaa, että halutuille muuttujille todellakin syntyy arvoja. Tämän voi testata palvelun Raporttivelho-sovelluksella ja suorittamalla haun halutuilla muuttujilla. Mikäli järjestelmäratkaisu sen mahdollistaa, olisi hyödyllistä nähdä ja saada keruuseen myös kohdelogiikan lukemat arvot. Vain tällöin on varmasti tiedossa lopullinen ohjaussignaali, jonka kohde lukee.

Kun arvojen muodostuminen on varmistettu, on tehtävä vielä tarkastelu niiden keskinäisestä korrelaatiosta. Muuttujien keskinäinen toiminta riippuu laskennan konfiguroinnista. On tärkeää tarkistaa, että tämä toiminta on kysyntäjoustop ohjauksen logiikan mukaista. Tätä varten on muuttujista kerättävä tarpeeksi pitkäkestoinen tarkastelujakso, jossa tapahtuu ohjauksen kannalta olennaisia muutoksia eli käytännössä

jouston aktivoitumista, ylös- ja alassäätötilanteita sekä normaalitilanteeseen palaamista. Jotta muuttujien oikea käyttäytyminen voidaan todentaa, on tarkastelussa käytettävä sekuntitason arvoja.

Kun ohjaussignaalien asianmukainen toiminta on varmistettu sekä ohjauksen toteutumisen kannalta tarpeelliset tietoliikenne- sekä automaatioasennukset suoritettu, on ohjausliikenne automaatiojärjestelmään asti valmis. Tämän jälkeen voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen, eli tehon reagoinnin tarkasteluun. Tämä suoritetaan samaan tapaan kuin ohjausmuuttujien testaus, mutta seurattavaksi tekijäksi lisätään kohteen tehotieto. Tehon on reagoitava oikein sekä suunnan, että suuruuden osalta sekä siinä aikaikkunassa, jonka Fingrid FCR-N -markkinalla vaatii.

8 JATKOKEHITYS

Projektin yhteydessä on luotu tiedonsiirron kannalta olennainen infrastruktuuri, jonka pohjalta on mahdollista kehittää laajempaa smart grid -järjestelmää. Asennettua SyncMinion-tiedonsiirtoyksikköä on kapasiteettinsa puolesta mahdollista käyttää myös kaikkeen jatkossa syntyvään tiedonsiirtoon ellei muuta estettä tälle ole.

Selkein jatkokehityskohde on kysyntäjoustopiiriin kytkettävän tehon lisääminen, mutta myös muita smart grid -järjestelmän kehityskohteita voitaisiin hallinnoida samalla sovelluksella, jota tässä työssä on hyödynnetty.

Ensimmäisen kysyntäjousto-osuuden jälkeen voidaan joustopiiriin kytkeä lisää kapasiteettia sitä mukaa, kun sitä laitokselta identifioidaan. Kylmälaitteiden laajempi käyttö toimisi hyvin samanlaisella periaatteella kuin nykyinenkin. Rajoittavana tekijänä on toki kylmätilojen lämpötilan säilyminen tehtaan tarvitsemissa rajoissa kaikkina hetkinä. Tällöin tulee huomioida miten suurta tehon alennusta on mahdollista suorittaa. Tämä voi rajoittaa joko kytkettyä kapasiteettia tai niiden perusteella tehtäviä tarjouksia.

Muita potentiaalisia säätökohteita kohteessa on ainakin led-valaistus, joka on osa tuotantolaitoksen uusittua valaistusjärjestelmää. Valaistuksen tehoa voidaan hetkellisesti muuttaa taajuusohjauksen perusteella. Järjestelmästä on jo kohdennettu led-valaistusta, joka tullaan ottamaan FCR-N -säädön piiriin.

Tulevan kapasiteetin tiedonkäsittelyn kannalta infrastruktuuri on jo olemassa. Taajuusohjatun käyttöreservin mukaiset prosessit toimivat pilvipalvelussa, joten näiltä osin ohjauksen lisääminen tapahtuu lähinnä uusien arvojen konfiguroinnilla. Projektin yhteydessä jo asennettu SyncMinion-tiedonkeruulaite voi toimia tiedonsiirrossa myös näiltä osin, mikä pitää kokonaisuuden yksinkertaisena.

Joustokapasiteetin kytkennän jälkeen järjestelmään voisi olla tarpeellista määrittellä hälytykset, jotka antavat ilmoitukset halutuille tahoille. Hälytyksen laukaisutekijä voisi olla ainakin yhteyden menetys palvelun ja kohteen välillä. Vastaavasti mikäli jonkun muuttujan arvo jollain ajanhetkellä olisi tyhjä, voitaisiin hälytys generoida, tosin myös tällöin olisi todennäköisesti kyse tiedonsiirtokatkoksesta. Hälytyksen voi määrittää

välitettäväksi halutuille henkilöille esimerkiksi sähköposti- tai tekstiviesti-ilmoituksella. Ilmoitus lähtisi ensisijaisesti ylläpidosta vastaavalle henkilölle sekä asiakkaalle.

Osana Nurmon Auringon älykästä järjestelmäkokonaisuutta on tarkoitus myös toteuttaa energian varastointia erillisellä akkujärjestelmällä. Tämän akkujärjestelmän ohjauksen eli lataus- ja purkuhetkien logiikan voi määrittää eri tavoilla riippuen millaista hyötyä siltä vaaditaan. Yksi mahdollisuus olisi kytkeä ohjaus jollain tavalla sähkön hintaan, jolloin halvan sähkön aikaan akkua ladattaisiin käytettäväksi hinnan ollessa suuri. Vastaavasti akun suomalla joustovaralla voitaisiin myös kompensoida kysyntäjouaston tehovaihteluita muualla järjestelmässä.

Periaatteessa akkutehoa voisi hyödyntää tuotantolaitoksen kulutuspiikkien tasaamiseen. Tämän kokoluokan jatkuvassa kulutuksessa ja kulutukseen verrattuna pienessä akussa tämä ei kuitenkaan ole relevanttia. Samoista mittakaavasyistä aurinkovoimalan tuotanto menee aina omaan kulutukseen eikä sen suhteen ole tarvetta kerätä sähköä odottamaan käyttöä muuten kuin edellä mainittujen hinta- tai taajuussignaalien perusteella. Riippumatta mahdollisen akun käyttöperiaatteesta myös sen automatisoitu ohjaus voitaisiin kytkeä samaan pilvipalveluun kysyntäjoustoprojektin kanssa.

Edellä mainittujen ohjauskohteiden lisäksi tehtaiden uusien aurinkovoimalaitosten hallinnointi ja raportointi olisi mahdollista toteuttaa käyttäen olemassa olevaa tiedonsiirtolaitteistoa tai korkeintaan yksi PC lisäämällä, mikäli voimaloiden tiedot saadaan esimerkiksi samasta virtuaaliverkosta. Raportointi voidaan ohjata samaan palveluun tai uuteen sijaintiin, jonne tarvittaessa replikoidaan esimerkiksi kysyntäjoustoprojektin resurssit.

Projektia tai sen osakokonaisuuksilla voi olla myös potentiaalista referenssiarvoa. Lopputuloksena on kokonaisuus, jossa useita yksittäisiä pieniä ja melko erilaisiakin tehon joustoon kykeneviä komponentteja on yhdistetty samassa palvelussa ohjattavaksi kokonaisuudeksi. Tämä tilanne on erilainen verrattuna prosessiin, jossa ohjataan vain yhtä melko homogeenistä komponenttijoukkoa. Näin ollen tulosta voidaan käyttää referenssinä esimerkiksi suurissa tuotantolaitoksissa, jossa ei välttämättä ole yhtä selkeää sääätöpotentiaalia, mutta useita pieniä virtoja, jotka voidaan yhdistää.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kuvata taajuusohjattuun käyttöreserviin kuuluvan kysyntäjoustokohteen asennus ja konfigurointi osana laajempaa älykkään sähköverkon taustajärjestelmää. Taustajärjestelmä on rakennettu tietojärjestelmäratkaisuihin erikoistuneen Syncron Tech:in ohjelmistolla ja sen toimittaa Syncron Tech:in tytäryhtiö SEAM Group.

Kohteena oleva järjestelmä on osa Nurmon Aurinko -aurinkovoimalaprojektia. Nurmon Aurinko on aurinkovoimalaitostoimittaja Solarigon ja Atrian yhteisomistuksessa. Projektissa Atrian Nurmon tuotantolaitosten yhteyteen asennetaan merkittävä määrä aurinkosähkökapasiteettia. Samalla testataan paikallista älykästä sähköverkkoa, johon kuuluu erilaisia sähkönkäyttöä optimoivia tekijöitä. Yksi näistä kysyntäjoustopon hyödyntäminen tuotantolaitosten eri kohteissa. Näistä ensimmäinen on 10 kappaletta varastojen viilennyksessä käytettävistä kylmäkoneista.

Työssä on esitetty laskenta, joka muodostaa ohjaussignaalit paikallisen kiinteistöautomaation kuormanohjausta varten. Laskenta perustuu Fingridin antamiin FCR-N -säädön määrittämiin. Laskennan alkuarvoina on itse mitatun verkon taajuuden lisäksi tieto taajuuden muutoksista suhteessa taajuuden perusvaihteluväliin. Yli 0,05 Hz muutos jompaankumpaan suuntaan 50,0 Hz perustaajuudesta aiheuttaa taajuusohjaustilan aktivoitumisen. Taajuusohjaus lakkaa, kun taajuus on jälleen 50,0 Hz. Näiden arvojen pohjalta on laskettu taajuusvirheen suhteellinen muutos säätöalueeseen nähden sekä ylösettä alassäätötilanteessa.

Laskennan seuraavassa vaiheessa on taajuuden tilanteen perusteella määritetty arvot vastaamaan automaatiojärjestelmän määrittämiä. Näitä arvoja lähetetään sekunnin resoluutiolla. Lähetettävät arvot koostuvat binääristä, joka ilmoittaa säätövelvoitteen olemassaolosta sekä lineaarisesti muuttuvasta säätötehon ohjausarvosta. Automaatiojärjestelmä myös lähettää tehoarvoja, jotka tallennetaan pilvipalveluun.

Lasketut ohjausarvot siirtyvät pilvipalvelusta internet-yhteyden kautta kohteessa sijaitsevaan tietokoneeseen, johon asennettu ohjelma suorittaa tietojen kyselyn sekä

lähettämisen. Tietokone välittää arvot modbus-yhteydellä kiinteistöautomaatioon, joka ohjaa laitteiston tehoa.

Työ liittyy viitekehykseltään laajemmin energiatekniikan murrokseen, jossa joustamattomien ja vaihtelevien tuotantomuotojen, kuten tuuli- ja aurinkoenergian, lisäksi tarvitaan vastaavasti kulutuksen sujuvaa joustoa sekä eri kokonaisuuksien tehokasta tiedonkeruuta sekä -siirtoa. Tähän kokonaisuuteen liittyy ja sitä edistää tässäkin projektissa hyödynnettävät pilvipalvelu- ja IoT-ratkaisut.

LÄHTEET

ABB, 2018. ABB Ability. [www-sivu], [Viitattu 19.9.2018]. Saatavissa: <https://new.abb.com/abb-ability>

Bayindir, R., Colak I., Fulli, G. & Demirtas, K., 2016. Smart grid technologies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 66, s. 499–516.

Energiavirasto, 2018. Sähkönpien tuotanto kovassa kasvussa. [www-sivu], [viitattu 12.9.2018]. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkonpien-tuotanto-kovassa-kasvussa-aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-2-5-kertaistui-vuodessa>

Euroopan komissio, 2018. 2020 climate & energy package. [www-sivu], [viitattu 11.8.2018]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en

Fingrid, 2017. Reservituotteet ja reservin markkinapaikat. [Verkkajulkaisu], [Viitattu 28.7.2018]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet.pdf>

Fingrid, 2018a. Esittely. [www-sivu], [Viitattu 28.7.2018]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/>

Fingrid, 2018b. Sähkömarkkinat. [www-sivu], [Viitattu 28.7.2018]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/>

Fingrid, 2018c. Tasepalvelut. [www-sivu], [Viitattu 28.7.2018]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/tasepalvelut/>

Fingrid, 2018d. Sähkömarkkinoiden tulevaisuus. [verkkajulkaisu], [Viitattu 15.7.2018]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/sahkomarkkinoiden_tulevaisuus.pdf

Fortum, 2018. TOPi® Energiatiedon hallintajärjestelmä. [www-sivu], [Viitattu 12.9.2018]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/palvelut-voimalaitoksille/lampovoimalaitoksille-ja/energianhallinta-ja-2>

Gilchrist, A., 2016. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Apress Media LLC, USA. ISBN 978-1-4842-2046-7.

Halme, M., Hukkinen, J., Korpi-Tommola, J., Linnannen, L., Liski, M., Lovio, R., Lund, P., Luukkanen, J., Partanen, J., Wilenius, M. & Nokso-Koivisto, O., 2015. Maamme energia. Into Kustannus, Helsinki. 145 s. ISBN 978-952-264-469-2.

Honkapuro, S., 2016. Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia sähkön käyttäjiä ja laskee sähkön hintaa. Smart Energy Transition. [Verkkójulkaisu], [viitattu: 28.7.2018]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/kysyntajousto-hyodyttaa-kaikkia-sahkon-kayttajia-ja-laskee-sahkon-hintaa/>

IRENA, 2018, Renewable capacity statistics. 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-057-0.

Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P., Rautiainen, A., Mutanen, A., Lummi, K., Supponen, A., Heljo, J., Sorri, J., Harsia, P., Honkiniemi, M., Kallioharju, K., Piikkilä, V., Luoma, J., Partanen, J., Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J. & Belonogova, N., 2015. Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. ISBN 978-952-15-3485-0.

Kasaei, M., Gandomkar, M. & Nikouar, J., 2017. Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant. Renewable Energy, volume 114, part B. s1180–1188.

Lanotte R. & Merro, M., 2018. A sematic theory of the Internet of Things. Information and Computation, Volume 259, Part 1, s. 72–10.

Mak, S., 2015. New Technologies for Smart Grid Operation. IOP Publishing, UK. ISBN 978-0-7503-1158-8.

Maintpartner, 2018. MP Intelligence. [www-sivu], [viitattu 18.9.2018]. Saatavissa: https://www.maintpartner.com/index.php/fi/teollisuuden-kunnossapito/tuottavuus-ja-digitaaliset-palvelut#MP_INtelligence

Motiva, 2017. Älykkäät sähköverkot. [www-sivu] [Viitattu 27.6.2018] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/alykkaat_sahkoverkot

Motiva, 2018. Tuulivoima. [www-sivu], [Viitattu 27.6.2018]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima

Mukhopadhyay, S. (toim.), 2014. Internet of Things Challenges and Opportunities. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Volume 9. Springer International Publishing, Sveitsi. ISBN 978-3-319-04222-0.

Nurmon Aurinko, 2018. [www-sivu], [viitattu 11.7.2018]. Saatavissa: <https://www.nurmonaurinko.fi/>

Pahkala, T., Uimonen, H. & Väre, V., 2018. Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä: Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. ISBN 978-952-327-346-7.

Partanen P., Viljainen S., Lassila J., Honkapuro S., Salovaara K., Annala S., Makkonen M., 2016. Sähkömarkkinat - operusmoniste. [LUT Moodle-materiaali], [viitattu 20.7.2018]

Statnett, 2018, Nordic power flow [www-sivu], viitattu 27.6.2018. Saatavissa: <http://www.statnett.no/en/Market-and-operations/Data-from-the-power-system/Nordic-power-flow/>

Suokko, A. & Partanen, R., 2017. Energian aika. WSOY, Helsinki. ISBN 978-951-0-42346-2.

Suomen tuulivoimayhdistys, 2018. Tietoa tuulivoimasta. [www-sivu], [viitattu 11.8.2018]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/>

Valkonen, J., Tommila, T., Jaakkola, L., Wahlström, B., Koponen, P., Kärkkäinen, S., Kumpulainen, L., Saari, P., Keskinen, S., Saaristo H. & Lehtonen, M., 2005. Paikallisten energiaresurssien hallinta hajautetussa energijärjestelmässä. VTT tiedotteita 2284. VTT. ISBN 951-38-6533-9.

Vihanninjoki, 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa - Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. [Verkkójulkaisu], [viitattu 16.6.2018]. Saatavissa: <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>

Vairinen, V., 2018. Solarigo Systems Oy. Keskustelut 28.6.2018

Vihinen, S., 2018. Sustainable Energy Asset Management Oy. Keskustelut 18.7.2018 ja 6.11.2018

VTT, 2009. Energy visions 2050. VTT/Edita, Helsinki. ISBN 978-951-37-5595-9.

Wortmann, F. & Flüchter, K., 2015. Internet of things Technology and Value Added. Business & Information Systems Engineering 2015, Vol.57, s. 221–224.

Ympäristöministeriö, 2017. Pariisin ilmastopöytäkirja [www-sivu] [Viitattu 20.9.2018] Saatavissa: <http://www.ymp.fi/pariisi2015>

ÅF Consult, 2018. Balance+, Adaptive Control Concept. [www-sivu] [Viitattu 18.9.2018] Saatavissa: <http://www.afconsult.com/en/do-business/our-services/international/thermal-energy/balance/>

LIITE 1. KYSYNTÄJOUSTON MARKKINAPAIKKOJEN PERUSTIEDOT

Tuote	Sopimustyyppi	Minimitarjouskoko	Markkinapaikan sulkeutumisaikajankohta	Aktivoituminen	Aktivoituu	Korvaustaso 2018 *)
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosi- ja tuntimarkkinat	0,1 MW	Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Useita kertoja tunnissa	14 €/MW,h (vuosimarkkinat)
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosi- ja tuntimarkkinat	1 MW	Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz kun f alle 49,5 Hz 50% 5s ja 100% 30s	Useita kertoja vuorokaudessa	4,5 €/MW,h (vuosimarkkinat)
			Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1s	Muutaman kerran vuodessa	
Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	D-1 klo 17:00	FG:n lähettämän tehopyyntisignaalin mukaisesti, 100% 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa	Kapasiteettikorvaus pay as as bid -periaatteella + energiahinta säätösähköhinnan mukaan
Säätösähkömarkkinat (mFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	45 min ennen käyttötuntia	100% 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti	Markkinahinta
Säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	Viikkomarkkinat	5 MW	Edellisviikon tiistaina klo 12:00	100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti	Kapasiteettikorvaus pay as a bid -periaatteella + energiahinta säätösähköhinnan mukaan
Vuorokausimarkkina (Elsport) **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	D-1 klo 13:00	12 h	-	Markkinahinta
Päivän sisäinen markkina (Elbas) **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	30 min ennen käyttötuntia	1 h	-	Markkinahinta
Tehoreservi ***)	Pitkäaikainen	10 MW	-	15 min kuormille, 12 h voimalaitoksille	Harvoin	EV:n hankintakilpailun mukaisesti