

Teollisuussähköverkon kaukokäyttöjärjestelmän uusiminen

Einari Näveri

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 30.7.2021.

Työn valvoja

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja

DI Jyrki Korpinen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Copyright © 2021 Einari Näveri

Tekijä Einari Näveri

Työn nimi Teollisuussähköverkon kaukokäyttöjärjestelmän uusiminen

Koulutusohjelma Automation and Electrical Engineering

Pääaine Electrical Power and Energy Engineering **Pääaineen koodi** ELEC3024

Työn valvoja Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja DI Jyrki Korpinen

Päivämäärä 30.7.2021

Sivumäärä 42

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä diplomityössä tutkitaan teollisuussähköverkon kaukokäyttöjärjestelmää ja sen kehittämistä. Tämä tehtiin kaukokäyttöjärjestelmän uusinnan yhteydessä. Työssä luodaan katsaus sähköjärjestelmän toimintaan ja käytönhallintaan, sekä kaukokäyttöjärjestelmään liittyvään kirjallisuuteen. Tutkimuskohteena olevan sähköverkon ja sen kaukokäyttöjärjestelmän rakenne ja toiminta kuvataan yleisellä tasolla. Näistä luodaan tarkat, mutta kuitenkin yleisellä tasolla pysyvät kuvaukset. Nämä toimivat hyvinä esimerkkeinä vastaavista teollisuussähköverkoista ja kaukokäyttöjärjestelmistä. Sähköjärjestelmien ja niihin liittyvien laitteiden lisäksi tarkastellaan pohjoismaisia sähkömarkkinoita sekä aiempaa tutkimusta prosessiteollisuuden kysyntäjoustopuolesta. Kirjallisuudesta pyritään myös löytämään arvioita Suomen sähkönkulutuksen kehityksestä tulevaisuudessa ja miten se vaikuttaa sähköjärjestelmiin ja -markkinoihin. Kaukokäyttöjärjestelmän energiamittauksen ja energiamittausten laskentakaavat päivitettiin vastaamaan nykyistä verkon rakennetta ja käyttöä. Haastattelemalla tuotantolaitosten edustajia selvitettiin millaisia puutteita energiamittauksessa on. Tämän perusteella selvitettiin kannattaako verkkoon lisätä energiamittareita sekä muokattiin laskentakaavoja. Kirjallisuuskatsauksen sekä tutkittavan sähköverkon pohjalta tehdään alustava kannattavuustutkimus Borealis Polymers Oyn mahdollisuuksista osallistua reservimarkkinoille. Kannattavuustutkimusta varten kerättiin pohjatietoja samoissa haastatteluissa joissa selvitettiin energiamittausten tila. Lisäksi tuotantolaitosten henkilökunnan kanssa käytiin tarvittaessa jatkokeskusteluja. Haastattelusta saatuja tietoja verrattiin reservimarkkinoiden vaatimuksiin ja markkinoista löytyviin tilastoihin. Näiden tietojen avulla selvitettiin osallistumismahdollisuuksia ja luotiin arvio mahdollisista tuotoista. Alustavasta arviosta saatiin tulokseksi että Borealikselta löytyy kohteita jotka voidaan tarjota säätösähkömarkkinoille. Muille reservimarkkinoille osallistuminen ei ole mahdollista muun muassa liian pitkistä reagointiajoista johtuen. Tutkimuksen perusteella tuotantolaitokset voisivat pienelläkin vaivalla ja riskillä osallistua reservimarkkinoille ja saavuttaa taloudellisia säästöjä, joten aihetta kannattaa tutkia lisää niin Borealiksella kuin muillakin vastaavilla tuotantolaitoksilla.

Avainsanat Teollisuussähköverkko, kaukokäyttöjärjestelmä, SCADA, reservimarkkinat

Author Einari Näveri

Title Remote control system renovation in industrial distribution grid

Degree programme Automation and Electrical Engineering

Major Electrical Power and Energy Engineering **Code of major** ELEC3024

Supervisor Prof. Matti Lehtonen

Advisor MSc Jyrki Korpinen

Date 30.7.2021

Number of pages 42

Language Finnish

Abstract

In this master's thesis we study SCADA-system of industrial distribution grid and its development possibilities. This research was performed during the renewal of the SCADA-system. SCADA is abbreviation of Supervisory control and data acquisition. At this thesis we give overview to the operation of industrial distribution grid. We also take a look at the supervisory of electrical system and SCADA applications. Structure of the studied power grid is presented in general level, along with the general level structure of the SCADA-system. These will work as great example of similar systems. We also conduct a literature review of future electricity consumption in Finland, and how this affects the Nordic electricity markets. In the latter part of the thesis we conduct interviews to different production line personnel, in order to define the demand for updating energy consumption calculations in SCADA. In the same time we will try to find out what kind of possibilities Borealis Polymers have to take part on the markets of electrical reserves and balancing power. Preliminary Feasibility study is conducted, which shows some interesting possibilities. We recommend that Borealis will study these possibilities more and similar industrial plants will conduct also research on the topic.

Keywords Industrial distribution grid, SCADA, reserves, electricity markets

Esipuhe

Tein diplomityön Neste Engineering Solutions Oy:lle, mutta aiheen työhön tarjosi Borealis Polymers Oy.

Kiitos työn loppuun ohjaamisesta Jyrki Korpiselle. Samoin kiitos Aki Suittiolle jonka ohjauksessa sain työn aloitettua, sekä kaikille siinä välissä auttaneille.

Ehdottoman suuri kiitos Keijo Kuosmaselle Borealiksen puolesta työn ohjeistamisesta, sekä kaikesta siitä maltillisesta avusta jota sain tämän pitkän projektin aikana. Kiitos kuuluu luonnollisesti myös kaikille niille Borealiksen työntekijöille, jotka työn aikana auttoivat tiedon saamisessa sekä tutkimuksessa eteenpäin pääsemisessä. Lisäksi kiitos SÄHE-osaamisen jakamisesta Ari Matilaiselle.

Matti Lehtoselle kuuluu kiitos työn valvomisesta. Näkemyksesi aiheesta auttoi muotoilemaan työstä mielenkiintoisen ja toivottavasti myös muillekin kuin minulle hyödyllisen. Kiitos myös kaikista niistä hauskoista ja mielenkiintoisista yksityiskohdista, joita tuntuu löytyvän lähes jokaisesta alaan liittyvästä aiheesta.

Perheeni ja ystäväni ovat olleet mitä suurin voimavara, tuki ja turva koko opiskeluaikani, sitä ennen ja sen jälkeen. Kiitos kaikesta suorasta ja epäsuorasta tuesta. Opiskelujen aikaisesta ajo-opetuksesta kiitän sydämeni pohjasta Veikko Sompaa sekä hänen ajo-oppilaitaan. Tuskin olisin tässä tilanteessa ja sama ihminen nyt ilman niitä kaikkia kokemuksia jotka olen kanssanne kokenut.

Kiitos Riikka! Kiiitettävää on enemmän kuin pystyn käsittelemään ja lisää on varmasti tulossa.

Helsingissä, 30.7.2021

Einari Näveri

Sisältö

| | |
|--|-----------|
| Tiivistelmä | 3 |
| Tiivistelmä (englanniksi) | 4 |
| Esipuhe | 5 |
| Sisältö | 6 |
| Symbolit ja lyhenteet | 7 |
| 1 Johdanto | 8 |
| 1.1 Tutkimuksen taustaa | 9 |
| 1.2 Tutkimusongelma | 9 |
| 1.3 Tutkimuksen tavoitteet | 10 |
| 1.4 Rajaukset | 11 |
| 1.5 Kilpilahden teollisuusalue | 11 |
| 2 Sähköjärjestelmä ja -markkinat | 13 |
| 2.1 Suomen sähköjärjestelmä | 14 |
| 2.2 Sähkötarkkinat suomessa ja pohjoismaissa | 16 |
| 2.2.1 Sähkötörssit | 16 |
| 2.3 Prosessiteollisuuden kysyntäjousto | 19 |
| 2.4 Sähkötukutuksen tulevaisuuden näkymät Suomessa | 21 |
| 2.5 Sähkötverkon käyttötoiminta | 22 |
| 2.6 Sähkötverkon kauköt käyttöjärjestelmä | 24 |
| 3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät | 28 |
| 3.1 Borealis Polymers Oyn sähkötverkko | 28 |
| 3.2 Kauköt käyttöjärjestelmä | 29 |
| 3.2.1 Vanha kauköt käyttöjärjestelmä SÄHE | 29 |
| 3.2.2 SCADA-järjestelmän uusintaprojekti ja sen tavoitteet | 29 |
| 3.2.3 Borealis Polymers Oyn MicroSCADA | 30 |
| 3.3 Kehitysmahdollisuudet kauköt käyttöjärjestelmän uusinnan yhteydessä | 31 |
| 3.4 Energiatöhokkuuden parantaminen | 33 |
| 4 Alustava kannattavuusarvio reservimarkkinoille osallistumisesta | 34 |
| 4.1 Polypropeenilaitoksen ekstruuderit | 34 |
| 4.1.1 Polyeteeni 2 -laitoksen ekstruuderit | 36 |
| 5 Johtopäätökset | 37 |
| 6 Lähdeluettelo | 38 |
| 7 Liitteet | 40 |

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

| | |
|-----|----------------|
| P | Teho |
| U | Jännite |
| I | Virta |
| V | Jännite |
| R | Resistanssi |
| kV | Kilovoltti |
| kW | Kilowatti |
| MW | Megawatti |
| kWh | kilowattitunti |
| MWh | Megawattitunti |

Lyhenteet

| | |
|-------|---|
| SCADA | Supervisory Control And Data Aquisition |
| OTC | Over the counter, kaikki sähkökauppa jota ei käydä sähköpörssissä |
| SÄHE | Porvoon jalostamon vanha energianhallintajärjestelmä |
| IP21 | AspenTechin InfoPlus.21 - prosessinohjausjärjestelmä |

1 Johdanto

Työssä tutkitaan Borealis Polymers Oyn (myöhemmin Borealis) sähköjakeluverkon kaukokäyttöjärjestelmän uusimista Kilpilahden teollisuusalueella Porvoossa. Tässä luvussa luodaan yleiskatsaus työn aiheisiin sekä tehtyyn tutkimukseen ja sen kohteeseen. Luvussa 1.1 esitellään tutkimuksen taustaa, luvussa 1.2 tutkimusongelmia, luvussa 1.3 tutkimuksen tavoitteita ja luvussa 1.4 tutkimuksen rajauksia. Lisäksi luvussa 1.5 esitellään lyhyesti Kilpilahden teollisuusaluetta.

Työssä pyritään löytämään kaukokäyttöjärjestelmästä kehityskohteita, jotka voidaan ottaa käyttöön uuden järjestelmän mukana. Lisäksi työn puitteissa etsitään energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä joita voidaan edistää sähköverkon nykyisten, tai uusien lisättävien mittausten avulla. Ensimmäinen askel tässä kaukokäyttöjärjestelmän kehittämisessä on energiamittauksen laskentakaavojen päivittäminen, jotka siirretään vanhasta järjestelmästä uuteen. Uusien energiamittareiden tarvetta selvitetään ja samalla pyritään löytämään kohteita joiden kulutustieto voi mahdollistaa tuotantoprosessin taloudellisempaa ajoa. Seuraavaksi tavoitteena on löytää kohteita, joiden energian kulutukseen voidaan mittausdatan avulla vaikuttaa, esimerkiksi tarpeettomasti tai tarpeettoman kovalla teholla käyvät moottorit. Lopuksi etsitään Borealoksen tuotantolaitoksilta kulutuskohteita, joita olisi mahdollista tarjota reservimarkkinoille.

Toisessa luvussa käydään läpi aihetta käsittelevää teoriaa ja tutkimusta. Kirjallisuuskatsauksessa esitetään sähköverkon rakennetta yleisesti, sähköjärjestelmän käyttöä ja toimintaa sekä kaukokäyttöjärjestelmän rakennetta ja toimintaa. Näiden lisäksi tutustutaan sähkömarkkinoihin ja kysyntäjoustoön niin yleisellä tasolla pyrkien huomioimaan prosessiteollisuuden erityispiirteet. Luvussa luodaan myös katsaus sähkönkulutuksen tulevaisuuden näkymiin Suomessa, pyrkien löytämään tekijöitä, jotka vaikuttavat erilaisten kysyntäjoustopuotteiden tarpeeseen ja niiden markkinahintaan.

Luvussa kolme tutustutaan tarkemmin tutkittavaan sähköverkkoon ja esitellään sekä vanha että uusi kaukokäyttöjärjestelmä. Kaukokäyttöjärjestelmän päivityksen yhteydessä tuotantolaitosten edustajat haastatellaan mittausten ja energialaskentakaavojen päivitystarpeiden selvittämiseksi. Samalla haastatteluissa etsitään energiatehokkuutta parantavia keinoja, sekä selvitetään löytyykö tuotantolaitoksilta potentiaalisia kuormia osallistumaan reservimarkkinoille.

Yhtenä tavoitteena on löytää energiamittausten kehittämiseen sellaisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat energiatehokkuuden parantamisen ja energian kulutuksen minimoimisen. Toinen pyrkimys on löytää muita sellaisia ratkaisuja joiden avulla voidaan saavuttaa taloudellisia säästöjä. Näitä keinoja on ensisijaisesti kulutusjoustopuotteiden toteuttaminen ja varsinkin reservimarkkinoille osallistuminen. Prosessin ja sähköverkon tarpeita pyritään selvittämään, jotta löydetään keinoja joilla energian mittaaminen saadaan palvelemaan sähköverkon käyttö ja valvontaa sekä tuotantoprosessia. Kaukokäyttöjärjestelmän energiamittauksen laskentakaavat pyritään päivittämään ja mittauksia lisäämään siten, että energian kulutus saadaan minimoitua.

Työn neljännessä luvussa tehdään alustava kannattavuusarvio valikoitujen kohteiden mahdollisuuksista osallistua reservimarkkinoille. Arvioitaviksi valikoidut kohteet

ovat Borealiksen tuotantolaitosten kulutuskohteita, jotka vaikuttavat ominaisuuksiltaan parhaiten reservimarkkinoille soveltuvilta. Näiden kulutuskohteiden osalta selvitetään mille reservimarkkinoille ne soveltuvat, sekä arvioidaan eri reservimarkkinoilta saatavien taloudellisten hyötyjen suuruutta. Tässä työssä ei tehdä lopullista arviota siitä, ovatko eri ratkaisut tuottavia vai eivät. Tavoitteena on luoda kuva siitä, millaisia mahdollisuuksia Borealiksella on reservimarkkinoille osallistumiseen, sekä piirtää suuntaviivoja niiden taloudellisesta potentiaalista.

1.1 Tutkimuksen taustaa

Borealis hankki omistamalleen ja hallinnoimalleen sähköverkolle Kilpilahteen uuden kaukokäyttöjärjestelmän keväällä 2020. Uusi järjestelmä hankittiin korvaamaan elinkaarensa lopussa oleva kaukokäyttöjärjestelmä SÄHE. Vanhassa SÄHE-järjestelmässä olevat energiamittauksen laskentakaavat siirretään uuteen microSCADA-järjestelmään. Osin jo vanhentuneet kaavat päivitetään siirron yhteydessä. Laskentakaavojen päivittämisen tavoitteena on saada mahdollisimman totuudenmukainen kuva kulutuksesta eri prosessiyksiköiden ja prosessin osien välillä.

Kaukokäyttöjärjestelmän vaihdon yhteydessä lisätään myös kulutusmittauksia tarpeellisiin kohtiin verkossa. Lisäksi projektin aikana on mahdollisuus vielä lisätä mittauksia sellaisiin pisteisiin, jotka laskentakaavojen päivittämisen yhteydessä havaitaan tarpeellisiksi.

Kun tiedetään tarkkaan kuinka paljon ja missä energiaa kuluu, voidaan tuotantoprosessia ohjata mahdollisimman taloudellisesti. Tarkka sähkönkulutuksen mittaaminen on myös edellytys kulutusjoustoos osallistumiselle. Teollisuuslaitokselle taloudellinen kannuste osallistua kulutusjoustoos on tarpeeksi suuri, kun saavutettu säästö tai joustosta saatu korvaus on suurempi kuin tuotannon vähenemisen, tai muun haitan, kuten tuotteen laadun aleneman, aiheuttama kustannus. Tämän työn tuloksena syntyviä arvioita taloudellisesta vaikutuksesta tullaan mahdollisesti tulevaisuudessa arvioimaan tässä valossa.

Näistä lähtökohdista valikoitui tutkimuksen aiheiksi sähkön kulutuksen mittaamisen tarkkuus sekä Borealiksen tuotantolaitosten sähkökuormien potentiaali kysyntäjoustoos. Kaukokäyttöjärjestelmästä on tavoitteena saada mahdollisimman hyvä kuva eri kohteiden sähkönkulutuksesta mittausten ja laskentakaavojen avulla. Kulutusjoustoos osallistumisen mahdollisuuksia ja tuottopotentiaalia tarkastellaan nykytilanteessa, mutta myös oletettavat muutokset Suomen sähkönkulutuksessa sekä sähkömarkkinoilla tulevaisuudessa pyritään huomioimaan .

1.2 Tutkimusongelma

Työssä tutkitaan sähköverkon kaukokäyttöjärjestelmää ja kehitysmahdollisuuksia sen uusinnan yhteydessä. Toisaalta tutkitaan kaukokäyttöjärjestelmän käytännön toteutusta eli mittausten määrää ja sijaintia sekä mittausdatan pohjalta laadittuja energialaskentakaavoja. Yhtäältä taas tutkitaan Borealiksen eri tuotantolaitosten mahdollisuutta kehittää energiatehokkuuttaan tai saavuttaa taloudellisia hyötyjä

esimerkiksi osallistumalla reservimarkkinoille.

Tutkimuksesta voidaan nostaa esiin kaksi pääongelmaa:

1. Kaukokäyttöjärjestelmän energialaskentakaavojen päivittäminen vastaamaan sähköverkon nykyistä rakennetta ja käyttöä sekä uusien energiamittareiden tarpeen selvittäminen.
2. Tarjoaako kaukokäyttöjärjestelmä mahdollisuuksia sähkön kulutuksen pienentämiseksi ja mitä muita mahdollisuuksia Borealiksen tuotantolaitoksilla on saavuttaa taloudellisia hyötyjä.

Ensimmäisen ongelman ratkaisuna pyritään saamaan mahdollisimman tarkka kuva sähkönkulutuksesta eri puolilla prosessia kuitenkin kustannustehokkaasti toteutettuna. Mittareita lisäämällä saavutetaan toki aina parempi mittaustarkkuus, mutta jokaiseen lähtöön mittauksen lisääminen ei kuitenkaan ole kannattavaa. Tavoitteena on siis löytää ne kohteet, joihin mittauksia lisäämällä saadaan mahdollisimman tarkka kuva sähkön kulutuksesta lisäämättä turhia mittareita.

Toiseen ongelmaan etsitään ratkaisuja, joilla kaukokäyttöjärjestelmä pystyy tukemaan Borealista parantamaan energiatehokkuuttaan. Voidaanko tarkemman mittausdatan avulla esimerkiksi parantaa tuotantoprosessin optimointia tai voidaanko sen avulla löytää kohteita joissa kuluu sähköenergiaa turhaan. Samalla pyritään selvittämään muita energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksia, kuten tarve päivittää suorakäyttöisiä sähkömootoreita taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Lisäksi tutkitaan eri tuotantolaitosten mahdollisuutta osallistua kysyntäjoukseen tai reservimarkkinoille.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on parantaa kaukokäyttöjärjestelmän energiamittauksen tarkkuutta sekä selvittää Borealiksen tuotantolaitosten kysyntäjoustopotentiaalia

Päätavoite on siis kaksiosainen:

1. Energiamittauksen laskentakaavojen päivittäminen ja lisämittausten tarpeen selvittäminen sekä laadukkaiden mittauksia täydentävien energialaskentakaavojen rakentaminen kaukokäyttöjärjestelmään.
2. Reservimarkkinoille osallistumisen alustavan kannattavuuden selvittäminen.

Tutkimuksen tavoitteena on luoda kaukokäyttöjärjestelmään mahdollisimman tarkka kuva Borealiksen sähköverkosta, sen käytöstä ja sähkönkulutuksesta. Energiamittauksen laskentakaavat päivitetään ja niihin pyritään löytämään ratkaisut

jotka tukevat energiamittausta mahdollisimman hyvin. Tämän tiedon avulla pyritään mahdollistamaan entistä energiatehokkaampi toiminta.

Taloudellisia hyötyjä voidaan saavuttaa energiatehokkuuden parantamisella, mutta myös esimerkiksi kulutusjoustoos osallistumalla. Parempi energiatehokkuus vähentää kulutetun sähköenergian määrää ja siten sähköstä maksettava hinta pienenee. Kulutusjoustoos keinoin voidaan saavuttaa säästöjä siirtämällä kulutusta kalliin sähkön hinnan ajalta edullisemmille tunneille. Mikäli sähkönhankinta on hyvin suojattu, voi kysyntäjoustoos kannattavuus olla vähäistä. Tällöin voidaan kuitenkin saavuttaa tuntuviakin taloudellisia hyötyjä myymällä sähkönkulutuskapasiteettia reservimarkkinoille.

1.4 Rajaukset

Työssä tutkitaan teollisuussähköverkkoa ja sen kaukokäyttöjärjestelmää. Esimerkkinä teollisuussähköverkosta toimii tutkittavana kohteena oleva Borealis Polymers Oyn sähköverkko Kilpilahden teollisuusalueella. Tutkimuksen kohteena oleva sähköverkko on keskijännitteinen ja sen mitoitusjännite on 10 kV. Työssä siis keskitytään 10 kV tai pienemmällä jännitteellä tapahtuvaan sähkönjakeluun.

Taustatietona kysyntäjoustooskohteiden alustavalle kannattavuustutkimukselle käytetään sähkönkäytön nykytilaa ja siinä tulevaisuudessa tapahtuvia muutoksia Suomessa sekä niiden vaikutus sähköverkon käyttöön, hallintaan ja sähkömarkkinoihin. Kysyntäjoustoos osallistumisen mahdollisuuksia tutkitaan Borealisen muovituotannon eri laitosten osalta, pääasiallisesti reservimarkkinoille osallistumiseen keskittyen. Kannattavuuden arviointi tehdään niiden kohteiden osalta, jotka teknisiltä ominaisuuksiltaan vaikuttavat parhaiten reservimarkkinoille sopivilta.

1.5 Kilpilahden teollisuusalue

Teollisuusalue Porvoon Kilpilahdessa on Pohjoismaiden suurin kemianteollisuuden keskus. Alueella on raakaöljystä aina muoveiksi asti ulottuva yhtenäinen tuotantoketju, sekä uusiutuvien tuotteiden tuotantoprosesseja. Lisäksi alueella toimii teknologiakeskus omine koelaitoksineen. Teollisuusalue on laajuudeltaan noin 13 neliökilometriä. [1]

Kilpilahden teollisuusalueella on oma voimalaitos joka tuottaa käyttöhyödykkeitä alueen yrityksille. Voimalaitoksen omistaa Kilpilahti Voimalaitos Oy (KPP), joka rakentaa alueelle myös uutta voimalaitosta. Uuden voimalaitoksen on tarkoitus käynnistyä vuoden 2021 aikana. Uuden voimalaitoksen höyryntuotantokapasiteetti on 450 MW ja sähköntuotannon kapasiteetti 30 MW. [2]

Kilpilahden suurin yritys on Neste Oyj, jonka jalostamo työllistää noin kolmannuksen alueen reilusta 3500 työntekijästä. Suunnittelu ja tutkimustoiminta mukaan luettuna Nesteellä työskentelee noin 2200 henkilöä Kilpilahdessa. [3]

Alueella on kolme muovituotetta tuottavaa tehdasta BEWI RAW Oy, Ineos Composites Finland Oy sekä Borealis Polymers Oy. BEWI RAW Oy valmistaa

vaahdotettavaa polystyreeniä eriste- ja pakkausteollisuuden raaka-aineeksi. Ineos Composites Finland Oy tuottaa polyesterihartseja lujitemuoviteollisuuden tarpeisiin. Borealiksella on Kilpilahdessa viisi tuotantoyksikköä: olefiini, fenoli, polyeteeni, polypropeeni ja Borstar-polyeteeni.

Kilpilahden sähköjakelusta vastaa Aurora Kilpilahti Oy, joka omistaa alueen sähköjakeluverkon. Jakeluverkko koostuu nykyisin 110 kV rengasverkosta, sekä keskijännite- ja pienjänniteverkoista. Asiakkaat liittyvät eri jännitetasoille oman tarpeensa mukaan. [4]

Sähköverkossa siirretään noin 1,8 TWh sähköä vuodessa Kilpilahden alueen yritysten käyttöön. Aurora Kilpilahdella on suljetun sähköverkon toimilupa. 110 kV sähköasemia on seitsemän ja niistä jokainen on syötetty vähintään kahdesta suunnasta toimitusvarmuuden takaamiseksi. Kantaverkkoyhteyksiä on kolme, joten sähkönsiirron varmuus on pitkälti taattua. [5] [4]

2 Sähköjärjestelmä ja -markkinat

Sähköjärjestelmä koostuu sähkön tuotannosta ja sähköä kuluttavista kuormista, sekä sähköverkosta jonka avulla tuotanto ja kulutus on liitetty toisiinsa. Tällaisessa sähkövoimajärjestelmässä sähköä voidaan siirtää suuria etäisyyksiä hyvällä hyötysuhteella, jonka ansiosta tuotannon ja kulutuksen ei tarvitse sijaita samassa paikassa. Täten esimerkiksi sähkön tuotanto voidaan keskittää suuriin voimalaitoksiin. Sähkön tuotanto onkin historiallisesti ollut kannattavinta toteuttaa keskitetysti niin hyötysuhteen kuin käyttövarmuudenkin puolesta. [6]

Sähkövoimajärjestelmässä on tuotettava sähköä saman verran kuin sitä kulutetaan. Tämän tasapainon on toteuduttava joka hetki tai tasapainoa kuvaava järjestelmän taajuus lähtee joko laskemaan tai nousemaan. Mikäli tuotantoa on enemmän kuin kulutusta alkaa taajuus kasvaa, ja vastaavasti laskema mikäli tuotantoa on kulutusta vähemmän. Sähköjärjestelmän taajuus on Suomessa ja Pohjoismaissa 50 Hz. Tämä on myös muualla Euroopassa yleinen taajuus, mutta esimerkiksi Yhdysvalloissa, Etelä-Amerikassa ja osassa Japania käytetään 60 Hz taajuutta. Luvussa 2.1 kerrotaan yleisesti sähköjärjestelmän toiminnasta, sekä tarkemmin Suomen sähköverkosta. [6]

Hajautetun tuotannon, sekä etenkin sääriippuvaisten tuuli- ja aurinkoenergian, lisääntyessä perinteinen sähköjärjestelmä on muutoksen edessä. Sääriippuvainen sähköntuotanto tuuli- ja aurinkovoimaloissa aiheuttaa haasteita järjestelmän tehotaapainon ylläpidolle.

Suomen sähköjärjestelmä on osa pohjoismaista yhteissähköverkkoa, johon se liitettiin jo vuonna 1959. Tämä yhteiskäyttöverkko muodostaa oman synkronisen saarekkeen, eli sähköverkossa on sama taajuus koko alueella. Saarekkeesta ei ole vaihtosähköyhteyksiä ulkopuolelle, vaan mahdolliset yhteydet muihin verkkoihin toteutetaan tasasähköyhteyksillä. [6]

Suomen ja Ruotsin sähköverkkojen välinen yhteys, joka valmistui vuonna 1959, osoittautui Suomelle erittäin kannattavaksi. Heti vuonna 1959 sähköä tuotiin Suomeen 136 GWh korvaamaan kuivuudesta johtuvaa vähäistä vesivoimatuotantoa. Tämä olikin alkuperäisiä perusteluja verkkojen yhdistämiselle, sillä aiempina vuosina Suomessa oli kärsitty sähköpulasta samaan aikaan kun Ruotsissa oli jouduttu juoksuttamaan vettä ohi padoista. [6]

Yhteisen sähköverkon tavoitteena onkin, että tuotantokoneistoa voidaan käyttää optimaalisesti. Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon jäsenmailla on melko erilaiset sähköntuotantorakenteet ja siten ne tukevat hyvin toisiaan. Laaja skaala sähköntuotantovaihtoehtoja verkossa mahdollistaa myös lämpövoiman taloudellisemmän ajon ja parantaa tehokkuutta entisestään. [6]

Suomen sähkömarkkinat vapautettiin kilpailulle vuonna 1995, tavoitteena tehokkuuden lisääminen sekä pohjoismaisille sähkömarkkinoille liittyminen. Sähkömarkkinoiden vapautumisen seurauksena sähkö ei ole enää yhteiskunnan ohjaama ja valvoma välttämättömyysperustarvike, vaan nykyisin sähkö nähdään samanlaisena kauppatavarana kuin mikä tahansa muukin tuote. Suomen toimitettavasta sähköstä käydään kauppaa esimerkiksi Nord Pool sähköpörssissä. [6]

Vapaat markkinat ja yhdistetyt sähköjärjestelmät vaativat paljon sähköverkoilta ja etenkin rajayhteyksiltä. Kun rajayhteyksien siirtokyky ei riitä, aiheutuu niin

sanottuja pullonkaula tilanteita joka hajauttaa sähkön hintaa sähkömarkkinoiden eri tarjousalueilla. Tarjousalueista sekä pullonkaulatilanteista kerrotaan lisää luvussa 2.2, jossa käsitellään sähkömarkkinoita. [6]

Vaikka sähkömarkkinat ovat vapaat ja yhteiskunnan ohjaus ja valvonta on poistettu, tarvitaan edelleen hyvät markkinasäännöt sekä toimiva markkinavalvonta. Mikäli markkinat eivät ole kunnossa voi seurata vakavia ongelmia. Esimerkiksi 2000-luvun alussa Kaliforniassa tämän kaltaiset puutteet johtivat sähköpulaan. Sähköstä käydään siis kauppaa vapaasti, mutta kuitenkin melko tarkoin määritellyin säännöin ja tiukan valvonnan alaisuudessa. [6]

2.1 Suomen sähköjärjestelmä

Suomessa sähköverkko kattaa käytännössä katsoen koko maan. Lähes kaikki maamme tuotanto ja kulutus on siis liitetty toisiinsa yhdeksi sähköjärjestelmäksi. Suomen sähkövoimajärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista sekä keski- ja pienjännitteisistä jakeluverkoista. Kantaverkossa sähköä 400 kV ja 220 kV mitoitusjännitteillä. Myös osa 110 kV verkosta lasketaan kantaverkkoon kuuluvaksi, mikäli se muodostaa silmukkaverkon tai voi toimia varayhteytenä 400 kV johdolle. Alueverkot ovat mitoitusjännitteeltään 110 kV tai 45 kV ja keskijännitteinen jakeluverkko 20 kV tai 10 kV. 45 kV ja 10 kV verkot ovat yleisesti historiallisia peruja ja joidenkin vanhojen kaupunkien keskustoissa saattaa olla vielä jäljellä jopa 6 kV verkkoa. Uudet rakennettavat verkot ovat kuitenkin pääosin mitoitusjännitteeltään 110 kV alueverkossa ja 20 kV jakeluverkossa. Pienjännitteinen jakeluverkko on mitoitusjännitteeltään 0,4 kV eli 400 voltia. [6] [7]

Yleensä sähkön jakelu tapahtuu pienjännitteellä, mutta jotkin teollisuuslaitokset sekä vastaavat suuret kuluttajat saattavat liittyä suoraan esimerkiksi 20 kV tai 110 kV verkkoihin. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköjärjestelmän periaatekaavio.

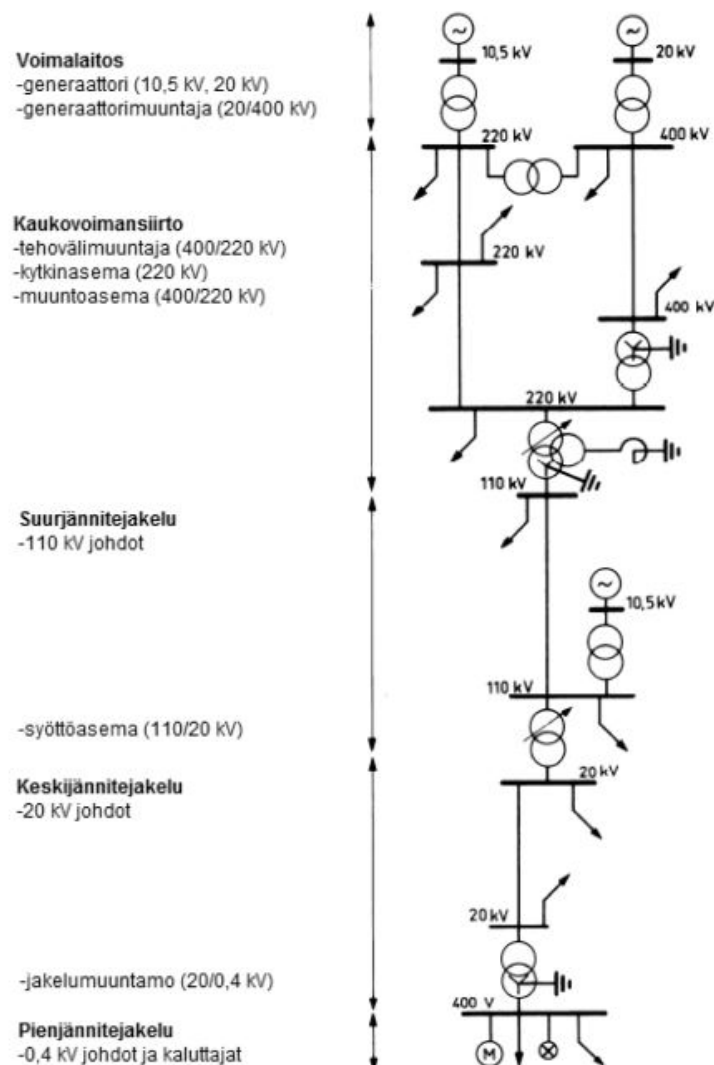
Sähköä siirrettäessä pitkiä etäisyyksiä tarvitaan suuria jännitteitä. Toisaalta suurjännitteiset laitteet tarvitsevat merkittävästi enemmän tilaa muun muassa turvaetäisyyksien säilyttämiseksi ja käytettävät komponentit ovat huomattavasti kalliimpia. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä pien- ja keskijännitteisten johtojen siirtokyvyistä. [7]

Taulukko 1: Esimerkkejä keski- ja pienjännitteisten johtojen siirtokyvystä [7]

| JÄNNITE | TEHO | SIIRTOMATKA |
|---------|------------------------|-------------------------|
| 110 kV | kymmeniä MW | n. 100 km |
| 20 kV | muutama MW | 20-30 km |
| 0,4 kV | kymmeniä tai satoja kW | muutamia satoja metrejä |

Sähkönsiirrossa aiheutuvat häviöt ovat muotoa:

$$P_h = RI^2 \quad (1)$$



Kuva 1: Suomen sähköjärjestelmän periaatekaavio [6]

jossa P_h on häviöteho

R on siirtojohdon resistanssi

I on johtimessa kulkeva virta

Teho taas on muodoltaan:

$$P = UI \quad (2)$$

jossa P on siirrettävä teho

U on jännite

I on johtimessa kulkeva virta

Täten kaavasta 2 nähdään, että käyttämällä suurempia jännitteitä on virta pienempi

kuin vastaavaa tehoa siirrettäessä pienemmällä jännitteellä. Kaava 1 taas osoittaa että virran ollessa pienempi, myös häviöt pysyvät merkittävästi matalampina. Jännitetason noustessa komponenttien hinnat kasvavat, mutta pienemmät häviöt kompensoivat tämän nopeasti. Kokonaiskannattavuuden näkökulmasta onkin usein viisainta valita liian korkea kuin liian matala jännitetaso.[6] [7]

Suomen sähköjärjestelmän systeemivastuu on kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:llä. Fingrid vastaa kantaverkon toiminnasta, sekä koko suomen kulutuksen ja tuotannon hetkellisestä tasapainosta. Tasehallinta, eli edellä mainittu hetkellinen tasapaino, toteutetaan Suomessa markkinaperusteisesti. Fingridillä ei ole omaa tuotantoa, vaan se ostaa kaiken tarvitsemansa tase- ja reservisähkön yhteispohjoismaisilta sähkömarkkinoilta.[6]

2.2 Sähkömarkkinat suomessa ja pohjoismaissa

Tässä luvussa tehdään katsaus suomen sähkömarkkinoihin alkaen vuosia eteenpäin käytävästä johdannaiskaupasta, ulottuen aina sähkön toimitusta seuraavaan tase-selvitykseen asti. Luvun neljä kannattavuusarvion kannalta erityinen mielenkiinto kohdistuu reservimarkkinoihin, mutta näiden merkityksen ja toiminnan ymmärtämiseksi on syytä tuntea sähkömarkkinoiden toiminta kokonaisuudessaan.

Sähkömarkkinat jaetaan niin sanottuun OTC (over the counter) -kauppaan, sekä pörssissä käytävään kaupankäyntiin. OTC-kauppaa on siis kaikki muu kuin pörssissä käytävä kauppa ja se voi olla hyvin monen muotoista. Esimerkiksi markkinaosapuolet voivat tehdä kahdenvälisiä sopimuksia, tuotteita voidaan myydä ja ostaa pörsseistä tai kauppaa voidaan käydä meklariyritysten välittämistä tuotteista. [6]

Johdannaismarkkinoiden tuotteet ovat sähkön hinnan johdannaisia, eivätkä kaupat suoraan johda sähkön fyysiseen toimitukseen. Johdannaismarkkinoilla tuotteet ovat esimerkiksi optioita ja futuureja, joilla eri toimijat voivat suojautua sähkön hinnanvaihteluilta. Johdannaismarkkinoilla esimerkiksi tuottajat voivat suojautua poikkeuksellisen matalilta, ja kuluttajat sekä sähkön myyjät poikkeuksellisen korkeilta hinnoilta. Johdannaismarkkinoilla tehdään usein pitkäaikaisia sopimuksia kaupankäynnin luonteesta johtuen. [9]

Johdannaismarkkinoita voisikin verrata kuluttaja-asiakkaan kiinteähintaiseen sähkösopimukseen, jossa sähkön hinta on koko sopimuskauden ajan sama, riippumatta pörssisähkön hinnasta. Kaupankäynti tuotteet ja sopimukset voivat toki olla johdannaismarkkinoilla hyvin monenlaisia.

2.2.1 Sähköpörssit

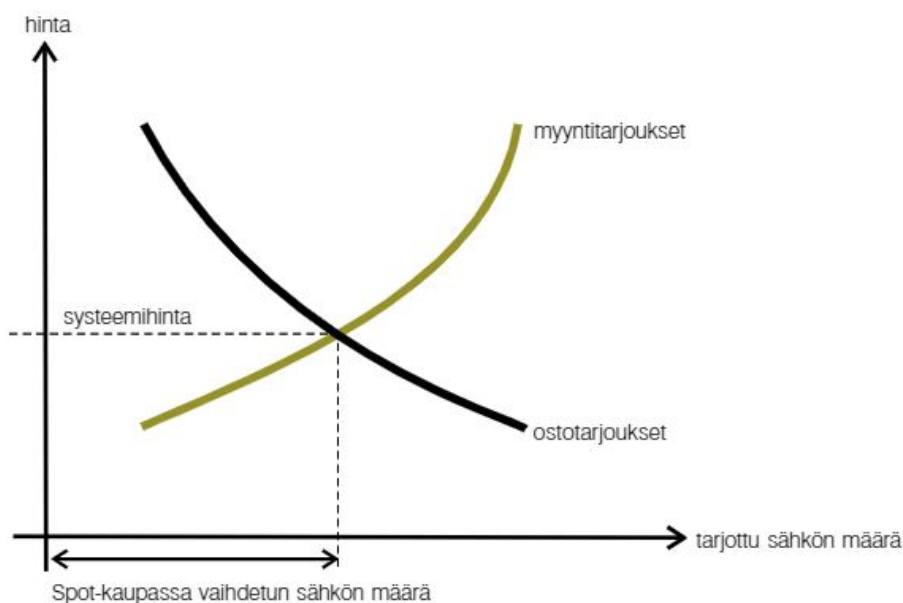
Sähköpörssissä käydään fyysiseen sähkötoimitukseen johtavaa kauppaa vuorokausimarkkinoilla ja päivän sisäisillä markkinoilla. Sähköpörssissä kauppaa voivat käydä vain pörssin jäsenet. Vastapuolena on aina pörssi, joka kattaa mahdolliset tappiot vakuuksilla. Vastapuoli riskiä ei siis ole. Vakuuksien antaminen on ehto pörssin jäseneksi pääsemiselle ja mikäli markkinaosapuoli ei jostain syystä toimita sovittua sähköä, kattaa pörssi tämä vakuuksista. [6]

Vuorokausimarkkinat

Vuorokausimarkkinoilla (day-ahead) kauppaa käydään seuraavan vuorokauden kaikille tunneille. Nord Pool on tarjonnut vuorokausimarkkinoita suomeen markkinoiden avautumisesta asti. EPEX SPOT SE sai Energiavirastolta 2016 oikeuden tarjota vuorokausimarkkinapalveluja sekä päivän sisäisiä markkinapalveluja Suomeen. Vuonna 2019 Nasdaq Oslo ASA sai oikeudet tarjota Suomeen vuorokausimarkkinapalveluja. EPEX SPOT SE aloitti päivänsisäisten markkinapalvelujen tarjoamisen 25.5.2020 ja vuorokausimarkkinoiden tarjoamisen 3.6.2020. [10]

Vaikka uusia toimijoita on tullut, on Nord Pool vielä toistaiseksi pysynyt selkeästi pääasiallisena sähköpörssinä Suomessa. Vuonna 2020 kaikesta Suomessa kulutetusta sähköstä myytiin 70% Nord Poolin kautta, kun EPEX SPOT SE kautta ostettu sähkö kattoi vain 4 %.. Nasdaq Oslo ASA ei vielä tarjoa palvelujaan Suomeen vaikka sillä oikeus siihen on. [10]

Kuten luvussa 2.1 mainittiin, sähköjärjestelmän tuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpito toteutetaan Suomessa markkinaperusteisesti. Pohjoismainen sähköjärjestelmä on siirtytyyksiin yhdistetty muualle Eurooppaan ja sähkön vuorokausimarkkinat ovat lähes koko EU:n laajuiset. [11] Sähköpörssit tasapainottavat tuotannon ja kulutuksen vuorokausimarkkinoilla, jossa pörssin jäseniä olevat sähkön myyjät ja ostajat käyvät huutokauppaa. Edellisenä päivänä kukin markkinaosapuoli antaa tarjouksensa siitä kuinka paljon ja mihin hintaan on valmis myymään tai ostamaan sähköä kullakin päivän tunnilla. Kysynnän ja tarjonnan mukaan määräytyy sähkön markkinahinta, niin sanottu systeemihinta. Kuvassa 2 on esitetty kuinka hinta määräytyy sähköpörssissä osto- ja myyntitarjousten mukaan. Osto- ja myyntitarjousten kuvaajien leikkauspiste määrittää sähköjärjestelmän systeemihinnan. [9]

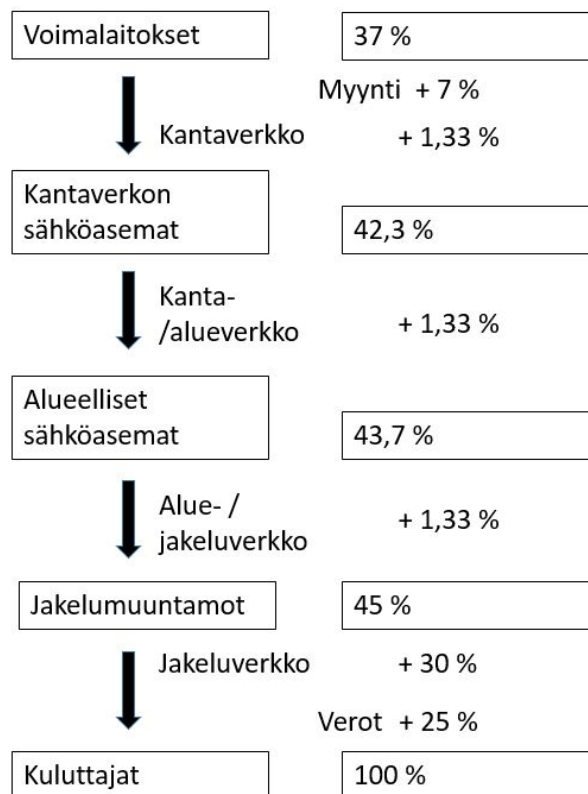


Kuva 2: Systeemihinnan määräytyminen sähköpörssissä

Sähkön hinnan muodostuminen sähköjärjestelmässä kertoo, mistä asiakashinta koostuu. Tämä muodostumismekanismi on esitetty kuvassa 3. Esitetyt prosentiosuudet antavat kuvan siitä suuruusluokasta joka kussakin osassa syntyy, vaikka prosentit

saattavat toki vaihdella markkinatilanteen ja sähköverkon regulaation kehityksen mukaan. Markkinaosapuolet laskevat tai arvioivat näitä tekijöitä ja määrittävät omat tarjouksensa.

Sähkön hinnan muodostuminen sähköjärjestelmässä kertoo, mistä asiakashinta koostuu. Tämä muodostumismekanismi on esitetty kuvassa 3. Esitetyt prosenttiosuudet antavat kuvan siitä suuruusluokasta joka kussakin osassa syntyy, vaikka prosentit saattavat toki vaihdella markkinatilanteen ja esimerkiksi sähköverkon regulaation kehityksen mukaan. Markkinaosapuolet laskevat tai arvioivat näitä tekijöitä ja määrittävät omat tarjouksensa



Kuva 3: Sähkön hinnan kehitys, mukailen [6]

Mikäli siirtoyhteydet eivät rajoita sähkön siirtoa, on koko markkina-alueella sähkön hintana systeemihinta. Mikäli siirtoyhteyksien kapasiteetti ei riitä, eriytyvät tarjousalueiden hinnat. [9]

Päivän sisäiset markkinat

Vaikka tuotanto ja kulutus tasapainotetaan päivää edeltävillä markkinoilla, tapahtuu näiden markkinoiden sulkeuduttua paljon. Sääolosuhteet voivat muuttua, jolloin varsinkin tuulienergian tuotanto saattaa erota merkittävästi ennustetusta. Toisaalta eri toimijoiden kulutus voi muuttua. Näiden syiden seurauksena eroavat toteutuneet tuotanto ja kulutus lopulta toisistaan käyttötunnin lähestyessä. Tätä

varten on olemassa päivän sisäiset markkinat (intra-day). Näiden markkinoiden avulla pyritään kulutus ja tuotanto tasapainottamaan aina käyttötuntia edeltävälle tunnille asti. [9]

Poikkeamia ei voi tämän jälkeenkään täysin välttää, vaan niitä tulee lähes väistämättä edelleen vielä käyttötunnin aikana. Esimerkiksi sähköntuotannon viat saattavat johtaa äkilliseen tarpeeseen korvata vuorokausimarkkinoille tai päivän sisäisille markkinoille myytyä tuotantoa. Toisaalta teollisuuslaitoksen laitevika voi johtaa siihen, että sen kulutus on merkittävästi pienempi, kuin se sähkön määrä jonka se on ostanut sähkömarkkinoilta. Järjestelmävastuullinen ylläpitää reservejä joiden avulla tehotasapaino säilytetään myös vika- ja muissa poikkeustilanteissa. [9]

Sähkötase

Sillä sähkön tuotannon ja kulutuksen on oltava jatkuvasti tasapainossa, on kukin markkinaosapuoli velvollinen tasapainottamaan oman taseensa. Tosin sanoen sähköä on ostettava yhtä paljon kuin sitä käyttää ja toisinpäin. Jos taseselvityksen jälkeen markkinatoimijan taseessa on poikkeamaa, joutuu hän maksamaan tasesähköstä tai saa maksua taseen suunnasta riippuen. Tasesähkön hinta on aina parhaimmillaankin vain vuorokausimarkkinan hinta. Tällä pyritään kannustamaan sähkönhankinnan tasapainottamiseen markkinoilla. [9]

Säätösähkö- ja reservimarkkinat

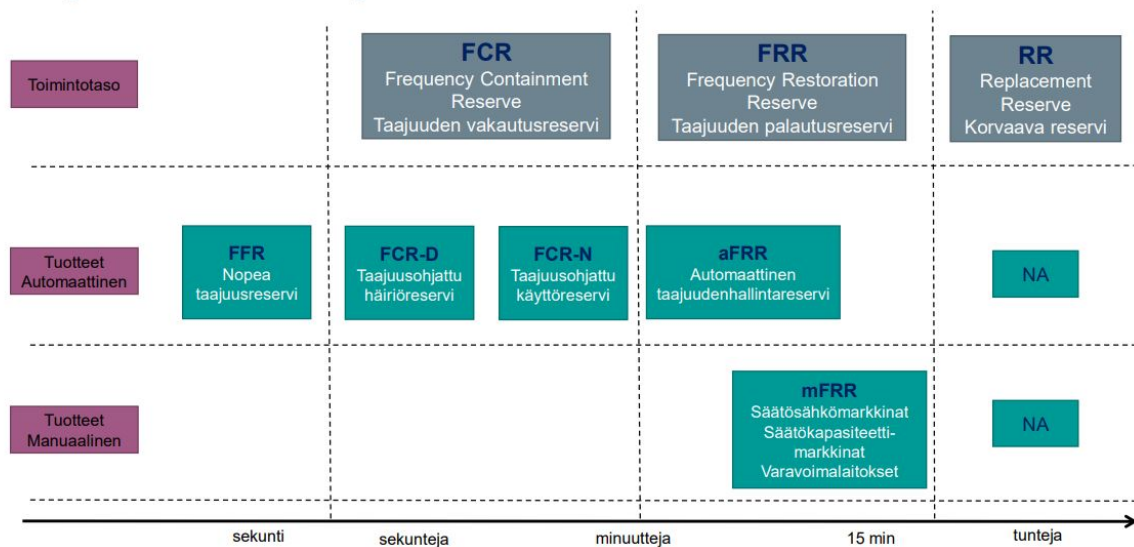
Mikäli sähköjärjestelmässä syntyy hetkellistä tasepoikkeamaa, eli kulutusta ja tuotantoa on eri määrä, alkaa taajuus muuttua kuten aiemmin luvussa 2 on kerrottu. Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ylläpitävät yhdessä säätösähkömarkkinoita. Markkinoiden avulla varmistetaan että järjestelmävastuullisilla on riittävästi säätökykyä tuotannon ja kulutuksen välisen tasapainon ylläpitoon. [9]

Lisäksi järjestelmävastuullinen ylläpitää reservejä joiden avulla taajuus pyritään pitämään mahdollisimman tasaisena ja mahdollistetaan riittävän nopea reagointi eri tilanteissa. Kuvassa 4 on esitetty Fingridin ylläpitämät reservimarkkinat. Reservit voivat olla osin myös pois kytkettävää kulutusta ja varsinkin nopeimpaan säätöön nämä ovat yleensä kykenevämpiä kuin sähkön tuotanto.

2.3 Prosessiteollisuuden kysyntäjousto

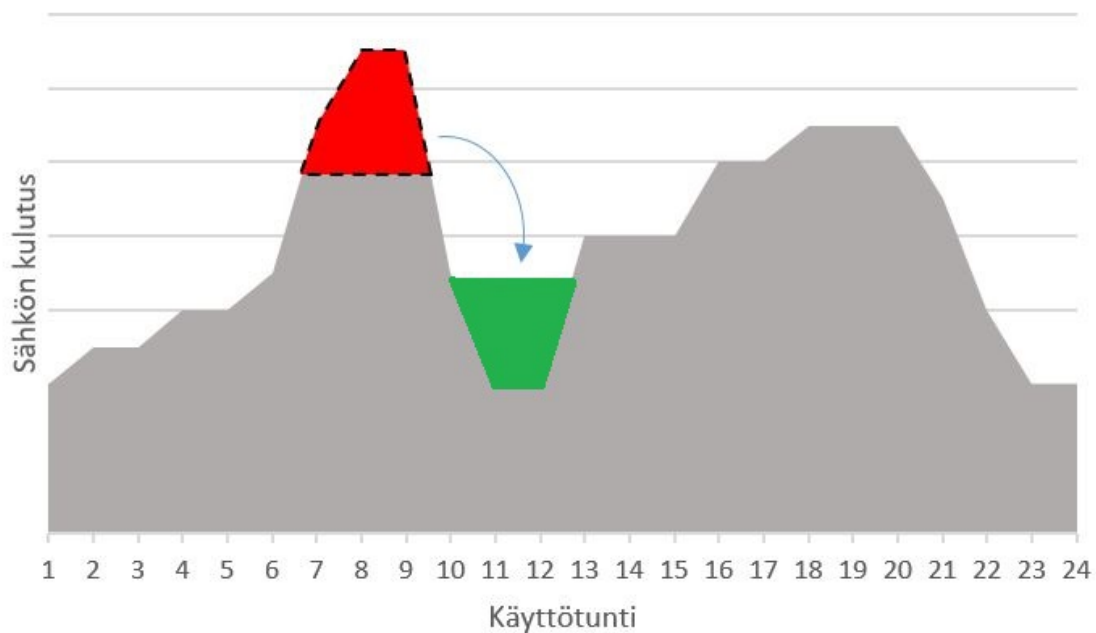
Kysynnänjoustolla tarkoitetaan sähkön kulutuksen vähentämistä tai lisäämistä sähköjärjestelmän tarpeen mukaan. Kulutusta saatetaan esimerkiksi vähentää silloin, kun sähkön hinta on korkea ja ajoittaa sähkön kulutus sellaiseen hetkeen jolloin hinta on matalampi. Tätä voidaan myös hyödyntää tehon hallinnassa, siirtämällä kulutusta tehopiikin hetkeltä matalamman kulutuksen aikaan. Kysynnänjouston mekanismeja on havainnollistettu kuvassa 5. Kulutushuipun aikaan punaisella merkitty osa kulutuksesta on saatu siirrettyä muutama tunti eteenpäin jolloin kulutus olisi ilman joustoa ollut vähäistä. Nyt vihreä osa kuvaa toteutunutta kulutusta aikana kun kulutusta ei olisi ollut ilman kysyntäjoustoa. Kulutuksen siirtäminen on voinut

Pohjoismaissa käytössä olevat reservit



Kuva 4: Pohjoismaiset reservimarkkinat [12]

olla kuluttajalle kannattavaa esimerkiksi markkinahintojen suuren eron takia.



Kuva 5: Havainnekuva kysyntäjoustosta

Sähkön kuluttajalle kysynnän jousto tarjoaa mahdollisuuden säästää sähkökustannuksissa, siirtämällä kulutusta kalliin hinnan ajalta edullisempaan ajankohtaan. Toinen vaihtoehto on myydä joustopotentialia säätösähkö- tai reservimarkkinoilla. Pohjimmiltaan tässäkin on kyse samasta asiasta, eli taloudellisen hyödyn saamisesta.

Kysyntäjousta voidaan myös hyödyntää tehotasapainon hallinnassa, kuten luvussa 2.2.3 kerrottiin. Mikäli sähköjärjestelmän säätötarve kasvaa tulevaisuudessa kuten viitteitä on, voi joustava kulutus hyötyä markkinatilanteesta. Tulevia muutoksia selvitetään tarkemmin seuraavassa luvussa.

VTT:n vuonna 2005 tekemässä kartoituksessa selvitettiin Suomen teollisuuden kysyntäjousta tilaa. Selvityksessä ilmeni, että iso määrä poiskytkettävää kuormaa on jo myyty reserveiksi. Muun muassa metsäteollisuus on ansioitunut tässä, mutta toisaalta se on myös eniten energiaa kuluttava teollisuusala Suomessa. Selvityksen mukaan potentiaalia oli vuonna 2004 vielä paljon muilla teollisuuden aloilla. Esimerkiksi prosessiteollisuudessa oli 1280 MW, tosin näistä iso osa on Olkiluoto 3 ydinvoimalan käyttöönoton jälkeen varattu häiriöreserviin. [13]

2.4 Sähkönkulutuksen tulevaisuuden näkymät Suomessa

Ilmastonmuutoksen hallinta on ollut jo vuosia merkittävässä asemassa poliittisessa toiminnassa ja sillä on suuri vaikutus kaikkiin yhteiskunnan osa-alueisiin. Tässä luvussa luodaan katsaus edessä oleviin muutospäätöksiin Suomessa ja millaisia vaikutuksia tällä oletetaan olevan sähköjärjestelmään ja sähkömarkkinoihin.

Poliittiset päätökset ajavat kohti päästötöntä energiajärjestelmää. EU päätti syksyllä 2014 päästövähennystavoitteista vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteena on 40 prosentin vähennys vuoteen 1990 verrattuna. Tavoitteen kustannustehokkaan toteutumisen onnistumiseksi laadittiin eri maille omat tavoitteet sekä päästökaupasektorille että sen ulkopuoliselle, niin sanotulle taakanjakosektorille. Päätöksessä suomelta vaaditaan 39 % päästövähennyksiä vuoteen 2030 mennessä vuoden 2005 päästötasoon verrattuna. Vuonna 2018 hyväksytyt direktiivit energiatehokkuudesta ja uusiutuvasta energiasta tiukensivat päästövähennystavoitteita entisestään. Vuoteen 2050 mennessä Suomi on sitoutunut EU:n päätöksen mukaiseen 80 - 95 % päästövähennystavoitteeseen. [14]

Nämä ovat lähtökohdat ilmastopolitiikan käytännön toimenpiteille, mutta eivät kuitenkaan riittävät täyttämään EU:n Pariisinsopimuksen sitoumusta rajoittaa ilmaston lämpenemisen 1,5 asteeseen. EU:n tavoite on olla ilmastoneutraali 2050 ja edelleen saavuttaa nettonegatiiviset päästöt vuosisadan loppupuolella. Kun tähän vielä lisätään YK:n ilmastopoliittisen oikeudenmukaisuusperiaate, jonka mukaan rikkaiden maiden tulee vähentää päästöjä enemmän ja nopeammin kuin köyhien, on Suomen oltava päästöiltään nettonegatiivinen aiemmin kuin EU keskimäärin. [14]

Suomella on kunnianhimoinen tavoite nostaa uusiutuvan energian osuus 50 % loppukulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Vaikka tavoite perustuukin suurelta osin bioenergian lisäämiseen, antaa se myös suuntaviivoja esimerkiksi tuulivoiman lisääntymiselle. On täysin mahdollista ettei energian tuotanto polttamalla ole lopulta se ratkaisu jota Suomi käyttää. Luultavasti energian tuottaminen polttamalla tulee kaiken kaikkiaan vähentymään tulevaisuudessa. Lisäksi Suomen tavoite sisältää esimerkiksi turpeen polton uusiutuvana energiamuotona josta kiistellään tälläkin hetkellä. [15]

Suomen Tuulivoimayhdistys arvioi tuulivoimatuotannon kaksinkertaistuvan Suomessa vuoteen 2030 mennessä. VTT:n selvityksen mukaan tuulivoimatekniikan kehi-

tyksen seurauksena koko suomen sähköntarve on mahdollista kattaa tuulivoimalla[16]. Tuulivoima joka jo nyt on markkinaehtoista, kasvattaa osuuttaan sähköntuotannossa, kunhan se on taloudellisesti kannattavaa.

Kun edelliseen vielä lisätään oikeuksien määrän väheneminen ja hinnan nousu EU:n päästökaupassa[15], voidaan kohtalaisella varmuudella olettaa tuulivoiman määrän jatkavan kasvuaan.

Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyminen vaikuttaa voimakkaasti sähköverkkoon. Tuotanto on vahvasti aikariippuvaista, eikä sitä voida tai kannata säätää. Lisäksi uusiutuva tuotanto ei yleensä sisällä suuria pyöriviä koneita toisin kuin perinteinen sähköntuotanto. Tämän seurauksena järjestelmän inertia pienenee ja se vastustaa huonommin tajuusmuutoksia. Kun vielä samanaikaisesti säätövoimaksi sopivia lauhdevoimaloita ajetaan alas kannattamattomina, nousevat kysyntäjoustoratkaisut entistä suurempaan rooliin. Säätövoimaa on perinteisesti tuotu ruotsista, mutta tarvetta tuskin ainakaan helpottaa se, että Ruotsissa suunnitellaan ydinvoimaloiden sulkemista [18]. EU-tasolla säätövoimaksi sopivan vanhentuvan lauhdevoimantuotannon ylläpitämiseksi on kaavailtu kapasiteettimaksuja. Nämä maksut olisivat kustannusvaikutukseltaan kymmeniä miljardeja. [17]

Yhteiskunnan entisestään kiihtyvä sähköistyminen, kuten sähköautojen yleistyminen, lisää säätötarvetta tulevaisuudessa. Kun samaan aikaan suuri määrä säätövoiman kannalta hyvää lämpövoimaan perustuvaa sähköntuotantoa poistuu kannattamattomana, tarvitaan uusia ratkaisuja säätösähkömarkkinoille. Säätövoimaksi soveltuvaa lauhdevoimakapasiteettia purettiin Suomessa 2450 MW vuosina 2015-2017. Samansuuntaista kehitystä on odotettavissa koko Länsi- ja Pohjois-Euroopassa, joten säätövoimaa ei myöskään voida laskea naapurimaiden tuontisähkön varaan. [17]

Sähkön varastointi voisi ratkaista ongelman ainakin osin, mutta nykymuodossaan se ei ole suuressa mittakaavassa mahdollista. Kysyntäjousto sen sijaan on mahdollista ja sen hyödyt kannattaa ulosmitata.

Suomessa säätösähköä käytetään tällä hetkellä suurimmalta osin vesivoimaa tai tuontisähköä, joka on naapurimaiden vesivoimaa. Suomen energiateollisuus arvioi 2016 Suomen päivittäisen säätösähkön tarpeen kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. [17]

Useilla markkinapaikoilla Suomessa teollisuuden suuria sähkökuormia hyödynnetään varsinkin häiriötilanteissa sähköntarpeen vähentämiseksi. Onnistuneesti toteutettu kysyntäjoustomarkkina voisi tarjota Suomelle omavaraisuutta sekä parhaassa tapauksessa mahdollisuuden myydä säätösähköä ulkomaille. VTT:n julkaisussa tällaisen kaupankäynnin ajatellaan olevan hyvin nopealla vasteajalla tapahtuvaa, kuten osakepörssiessä. Nykyisellä digitaalisella tekniikalla tällaisille markkinoille voitaisiin saada mukaan hyvin monenlaista rakennusta ja laitteistoa. [17]

2.5 Sähköverkon käyttötoiminta

Sähköverkon käyttötoiminnalla tarkoitetaan suoria valvonta- ja ohjaustoimenpiteitä joiden avulla hallitaan energian siirto- ja jakeluprosessia. Tässä luvussa tehdään lyhyt katsaus sähköverkon hallintaan ja käyttötoimintaan. Käytönvalvonnassa on

yksinkertaistetusti tavoitteena saada tarpeeksi tarkka kuva verkon vallitsevasta käyttötilanteesta. Yksityiskohtaisen tiedon avulla voidaan tehdä päätökset tarvittavista toimenpiteistä. Vika- tai muissa poikkeustilanteissa päätökset ja toimenpiteet saadaan tehtyä riittävällä nopeudella, kun käytönvalvonnan tieto on tarpeeksi tarkkaa ja reaaliaikaista. Käytönohjauksen tavoite on pääpiirteissään sähköverkon taloudellisen toiminnan ylläpitäminen, sekä sähköntoimituksen keskeytyksien pitäminen mahdollisimman lyhyinä ja harvinaisina. [19]

Laajoissa sähköjärjestelmissä valvonta on toteutettu hierarkisesti. Esimerkiksi Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid valvoo ja ohjaa kantaverkkoa. Alue- sekä jakeluverkonhaltijat toteuttavat omat verkon valvonta ja käyttötoimintonsa ja toimittavat omasta verkostaan kriittistä tietoa ylemmän jännitetaso verkonhaltijalle. [19]

Käytön valvonnan tehtävät sisältävät muun muassa seuraavaa:

- Sähköverkon käytön suunnittelu ja valvonta
- verkon järjestelmäteknisten vaatimusten ylläpito
- sähkönsiirron tai jakelun hallinta
- tasehallinta
- häiriötilanteiden hallinta
- mittaukset ja käyttövarmuustiedonvaihto

Ylläoleva listaus on tehty kantaverkon käytönvalvonnan tehtävien perusteella. Eri verkonhaltioiden käytönvalvonnan tehtävät eroavat luonnollisesti yllämainituista riippuen hallintoitavan sähköverkon ominaisuuksista sekä sijainnista sähköjärjestelmässä. [19]

Käyttöä suunnitellaan sekä pitkällä, että lyhyellä aikavälillä. Käytönsuunnittelulla tarkoitetaan lyhyen aikavälin suunnittelua. Sen tavoitteena on turvallinen, luotettava ja taloudellinen sähköntoimitus myös rajoitusten vallitessa ja muissa poikkeustilanteissa. [19]

Keskijännitteinen jakeluverkko on Suomessa mitoitusjännitteeltään pääosin 20 kV ja siinä siirretään suhteellisen pieniä tehoja pitkiä matkoja. Suurin osa verkosta on edelleen ilmajohtoa, vaikka säävarmuuden parantamisen nimissä verkkoa kaapeloidaan kovaa vauhtia.

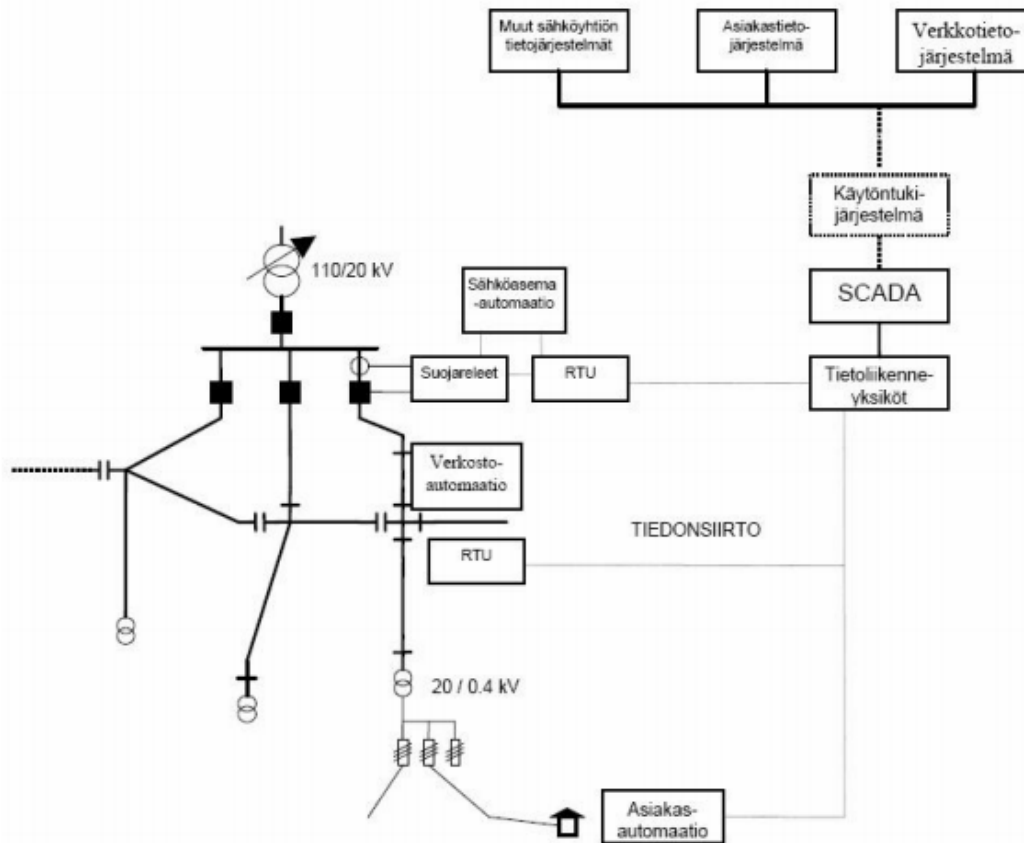
Teollisuussähköverkot ovat usein huomattavan pienellä alueella verrattuna verkko-yhtiöiden jakeluverkkoihin. Teollisuussähköverkoissa kuitenkin siirretään suuria tehoja. Teollisuuden sähköverkoissa on käytössä tavanomaisten jakeluverkkojännitteiden lisäksi myös 6 kV, 3 kV ja 690 V sekä 525 V mitoitusjännitteitä. [20]

Prosessiteollisuuslaitoksen sähkönjakeluautomaatio voidaan jakaa seuraaviin kokonaisuuksiin:

- kaukokäyttöjärjestelmät
- energianhallintajärjestelmä
- sähköasema-automaatio
- kuormien hallintajärjestelmä

Kuvassa 6 on esitetty yleiskuva sähkönjakeluautomaation eri osista sekä käyttötoi-

minnan apuvälineistä.



Kuva 6: Käyttötoiminnan apuvälineet [7]

2.6 Sähköverkon kaukokäyttöjärjestelmä

Tässä luvussa esitetään sähköverkon kaukokäyttöjärjestelmää yleisesti. Luvussa 3.2.3 tutustutaan tarkemmin tutkimuksen kohteena olevan Borealiksen sähköverkon kaukokäyttöjärjestelmään.

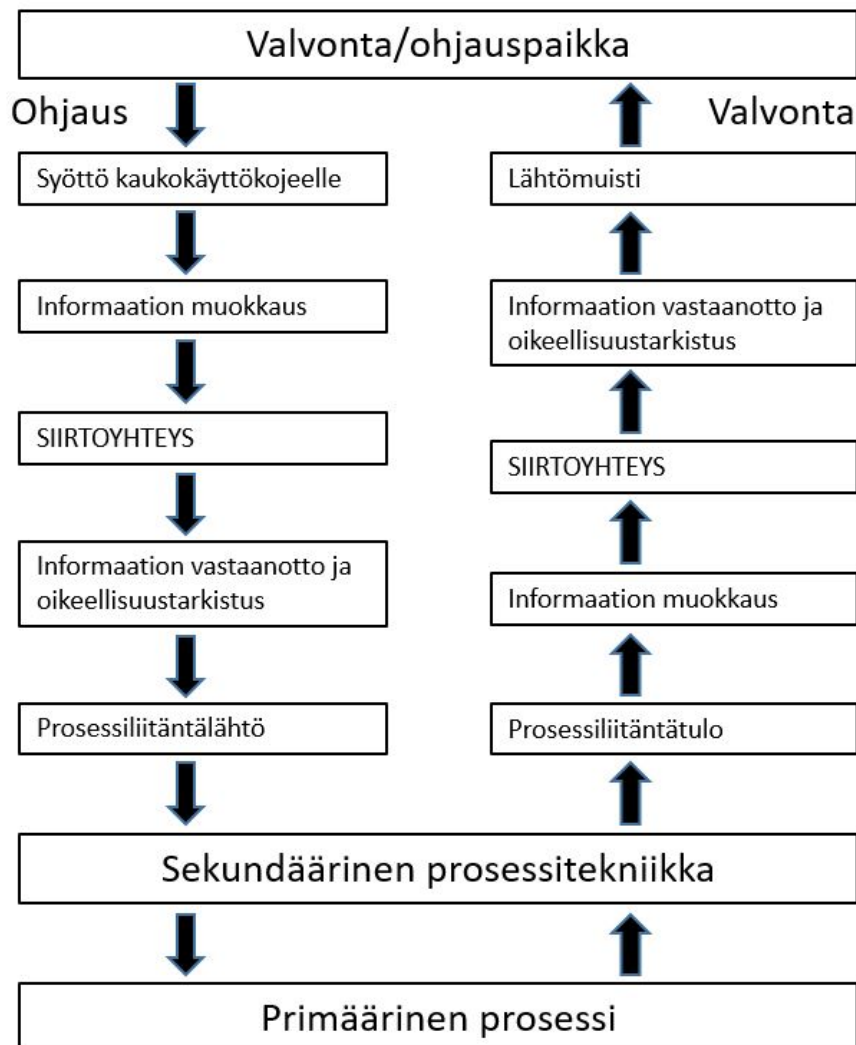
Sähköverkon käyttöä varten on kerättävä runsaasti tietoja, kuten virta- ja jännitetiedot verkon eri osissa sekä tieto kytkinten asennoista ja niissä tapahtuvista muutoksista. Suhteellisen pienestäkin sähköverkosta kerättävän datan määrä kasvaa nopeasti suureksi. [19]

Sähköverkkojen kehityksen alkuvaiheessa signaalit olivat langoitettu kahden pisteen välille. Tämä tarkoitti sitä, että jokaista signaalia varten tarvittiin oma kaapeli. Toisiokaapeleiden määrä helposti moninkertaistuu, jos samaa tietoa viedään useampiin, jopa kymmeneen eri kohteisiin. [19]

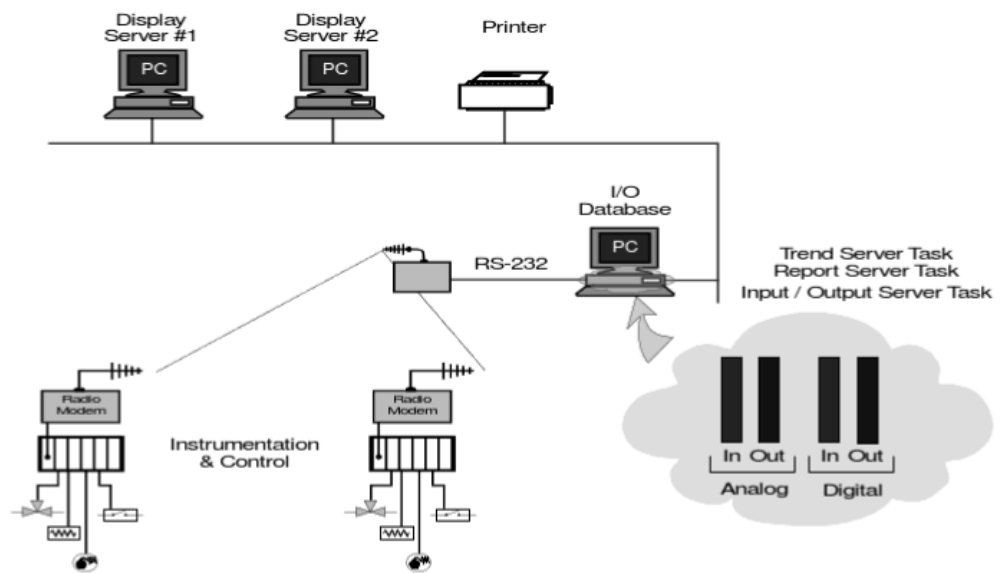
Tätä sähköverkosta kerättävää tietoa varten verkkoyhtiöllä on käytönvalvontajärjestelmä. Yhteen järjestelmään keskitetty verkon ohjaus ja valvonta mahdollistaa

verkon teknisen laatutason parantamisen sekä vähentää tarvittavaa työvoimaa. Valvonta on usein automaattista ja saattaa sisältää toimintoja kuten laskentaa, tietojen tallentamista ja raportointia. Kaukokäyttöjärjestelmästä, joka nykyisin sisältää käyttötoimintojen lisäksi datan keruun ja tallennuksen, käytetään yleisesti nimitystä SCADA (supervisory control and data acquisition -system) [19]

Kuvassa 7 on esitetty kaukokäyttöjärjestelmän toimintakaavio. Kaavio kuvaa askeleet jotka kaukokäyttöjärjestelmässä kulkeva tieto käy läpi sen siirtyessä ohjauspaikalta prosessilaitteelle. Kuvassa 8 on kaukokäyttöjärjestelmälle esitetty yleinen järjestelmäkaavio, josta nähdään fyysiset laitteet jotka ohjaus ja valvontasignaaleja kuljettaa. Siirtoyhteytenä on esitetty radiomodeemi, mutta yhteysvaihtoehtoja on monia.



Kuva 7: Kaukokäyttöjärjestelmän toimintakaavio [19]



Kuva 8: Kaukokäyttöjärjestelmän yleinen järjestelmäkaavio [21]

Käytönvalvontajärjestelmän päätoiminnot on listattu alla

- tapahtumatietojen hallinta
- verkon kytkentätilanteen hallinta
- kauko-ohjaukset
- kaukomittaukset
- kaukoasettelu
- raportointi

3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tämän tutkimuksen kohteena on Borealiksen sähkönjakeluverkko Kilpilahden teollisuusalueella sekä sen kaukokäyttöjärjestelmä. Tässä luvussa Borealiksen sähköverkko kuvataan yleisellä tasolla, pyrkien esittämään se esimerkkinä teollisuussähköverkosta yleisesti. Borealiksen kaukokäyttöjärjestelmään tutustutaan luvussa 3.2. Luvussa esitellään sekä vanha että uusi kaukokäyttöjärjestelmä, sekä uusintaprojektin kulkua ja uusinnan tavoitteita.

Kaukokäyttöjärjestelmän uusiminen on hyvä aika päivittää myös järjestelmän toiminnallisuutta. Vaikka uusi järjestelmä ei sinänsä toisikaan mukanaan uusia mahdollisuuksia, on järjestelmän ja sähköverkon läpikäynnin yhteydessä käytännöllistä miettiä, mitä uusia ominaisuuksia ja ratkaisuja voidaan toteuttaa. Näitä kehitysmahdollisuuksia tutkitaan kappaleessa 3.3.

Tämän diplomityön yhteydessä päivitettiin vanhassa SÄHE-järjestelmässä olleet energiamittausten laskentakaavat, ennen niiden siirtoa uuteen SCADA-järjestelmään. Lisäksi selvitettiin mahdollisia uusia ratkaisuja joita SCADA-järjestelmää hyödyntäen voidaan toteuttaa. Tässä työssä käsiteltäviä mahdollisia uusia ominaisuuksia ovat jotkin kysyntäjoustoratkaisuihin liittyvät toimet, joita Borealiksen tuotantolaitoksilla olisi mahdollista ottaa käyttöön. Kysyntäjoustoratkaisumahdollisuuksia, niiden taloudellista potentiaalia sekä alustavaa kannattavuutta eri tuotantolaitoksilla käsitellään työn neljännessä luvussa.

3.1 Borealis Polymers Oyn sähköverkko

Borealis omistaa tuotantolaitoksiaan syöttävän sähkönjakeluverkkonsa Kilpilahden teollisuusalueella. Verkko on yhteydessä Kilpilahden alueen jakeluverkkoon, sekä Nesteen Porvoon jalostamon sähköverkkoon ja kilpilahden voimalaitokseen. Kilpilahden alueella sähkön jakelusta vastaa Aurora Kilpilahti Oy. Kilpilahden teollisuusalueen sähköverkko on esitelty yleisellä tasolla luvussa 1.5.

Borealiksen sähköverkko syöttää yhdeksää tuotantolaitosta ja kahta koelaitosta. Kokonaisteho verkossa on 75 MW ja on normaalikäytössä hyvin tasainen. Teho jakaantuu kolmen päämuuntamon kesken karkeasti 50%, 25% ja 25 %. Jokaisella päämuuntamolla on kaksi päämuuntajaa jotka muuntavat 110 kV jännitteen 10 kV:in. Jakelujännitteen 10 kV lisäksi verkossa on 3,15 kV kojeistoja, sekä 690 V ja 400 V kojeistoja.

Muuntamoiden määrä vaihtelee tuotantolaitoksittain. Sähkönjakelu tapahtuu osin myös hieman ristiin eri tuotantolaitosten muuntamoiden kesken. Kun laitokset alun perin rakennettiin, lähtökohtaisesti yksi muuntamo syötti yhtä tehdasta, mutta tilanne on muuttunut sähköverkon kehittyessä. Nykyisin muuntamoita on noin 25.

Borealiksen sähköverkko on rakenteeltaan silmukoitu, joka parantaa entisestään käyttövarmuutta. Kuormat joita Borealiksen sähköverkko syöttää ovat

- Moottorikuormat, suurin
- Petrokemian laitoksien sähkösaattokuorma, merkittävä
- Alueen valaistuskouorma

Vaikka Borealiksen sähköverkossa on paljon loistehoa kuluttavia laitteita, kuten

moottoreita, on verkon kokonaistehokerroin hyvä. Loistehoa kompensoidaan kojeisto-kohtaisesti kaikilla jännitetasoilla tarpeen mukaan.

Suurimpia sähkökuluttajia ovat isot moottorikäytöt. Suurin 9,3 MW ja muita isoja (esimerkiksi ekstruuderit polypropeenilaitoksella ja polyeteeni 2 -laitoksella.) Lisäksi petrokemian laitoksilla on suuri määrä sähkösaattolämmitettyjä prosessiputkistoja. Näiden sähkösaattojen muodostama kokonaiskulutus on merkittävä. Borealoksen sähköverkossa siirretään noin 75 MW tehoa. Tehtaiden kulutusprofiilit ovat peruskäytössä hyvin tasaisia, joten mikäli tuotannossa ei tapahdu poikkeamia, pysyy siirrettävä sähkön määrä hyvin vakiona.

3.2 Kaukokäyttöjärjestelmä

Tämä luku käsittelee Borealoksen sähköverkon kaukokäyttöjärjestelmää. Luvussa esitellään vanha kaukokäyttöjärjestelmä josta siirrytään pois, uusinta projekti ja sen taustat sekä uusi kaukokäyttöjärjestelmä. Lisäksi luvussa 3.3 käydään läpi kaukokäyttöjärjestelmän kehitysmahdollisuuksia.

3.2.1 Vanha kaukokäyttöjärjestelmä SÄHE

Borealoksen nykyinen kaukokäyttöjärjestelmä SÄHE oli vuodesta 2003 lähtien lähes koko Kilpilahden alueen yhteinen energianhallintajärjestelmä. Se on toiminut luotettavasti tähän päivään saakka, mutta on jo saavuttamassa elinkaarensa päätä. Kilpilahden alueen eri toimintojen yhtiöittämisen myötä eri osapuolet ovat hankkineet omia järjestelmiä kukin omiin eri tarpeisiinsa.

SÄHE on PMSNT ohjelmiston ympärille rakennettu prosessi-informaatiojärjestelmä. Alustana toimii OpenVMS käyttöjärjestelmällä varustetut palvelimet ja energianhallintasovellus toimii Windows palvelimella. VMS käyttöjärjestelmän kehitys on jo lopetettu, ja vaikka varaosia ja huoltopalvelua on edelleen saatavilla, vähenee järjestelmäosaaminen sekä varaosien saatavuus nopeasti. Täten Borealis viimeisenä SÄHEä käyttävänä yhtiönä on myös tullut tilanteeseen jossa järjestelmä on aika vaihtaa nykyaikaisempaan.

Borealoksen alueen energiakulutuksen laskentakaavat ovat SÄHE-järjestelmässä ja siirretään uuteen SCADA-järjestelmään. Kaavat ovat jo vanhentuneita ja päivitetään siirron yhteydessä vastaamaan nykytilaa. Uuden SCADA-järjestelmän käyttöönotto ala-asema tasolla tapahtuu vaiheittain. Ensin siirtyi Petrokemian aromaattien tuotanto keväällä 2021. Muut tuotantolaitokset liitetään uuteen SCADA-järjestelmään vaiheittain kunkin yksikkösisokin aikana.

Kaikki mittausdata siirretään SCADAan käyttöönotosta lähtien. SÄHE-järjestelmään jäävien ala-asemien mittausdatan saadaan siirrettyä uuteen järjestelmään CTS tiedonsiirtoprotokollaa käyttäen.

3.2.2 SCADA-järjestelmän uusintaprojekti ja sen tavoitteet

Kuten kappaleessa 3.2 kerrottiin, on nykyinen kaukokäyttöjärjestelmä SÄHE lähes-työssä elinkaarensa loppua. Borealis Polymers Oy hankki keväällä 2020 uuden

kaukokäyttöjärjestelmän: ABB:n toimittaman microSCADA. Nesteen jalostamon kevään 2020 suurseisokin kanssa samanaikaisessa seisokissa oli tarkoitus ottaa microSCADA käyttöön aromaattien tuotannossa ja myöhemmin vaiheittain muissa tuotantoyksiköissä kunkin seisokin yhteydessä. Koronaviruksesta seuranneet poikkeusolot pakottivat kuitenkin seisokin siirtämisen vuodella eteenpäin ja näin myös SCADA-järjestelmän käyttöönotto siirtyi. Seisokki kuitenkin toteutui 2021 ja samalla toteutettiin seisokki Borealoksen petrokemian tehtailla.

Ensisijainen tavoite SCADA-järjestelmän uusimiselle on saada nykyaikainen järjestelmä, jolle on tarjolla kehitystä ja tukea. Uusinnan yhteydessä tehdään parannuksia sähkökulutuksen mittaukseen ja pyritään saamaan kulutuksen seuranta ajan tasalle. Energiamittareita lisätään kaikille pienjännitekeskuksille, sekä mahdollisesti selvityksessä löydetuille kohteille joihin mittauksen lisääminen on hyödyllistä ja kustannustehokasta tai muuten perustellusti kannattavaa.

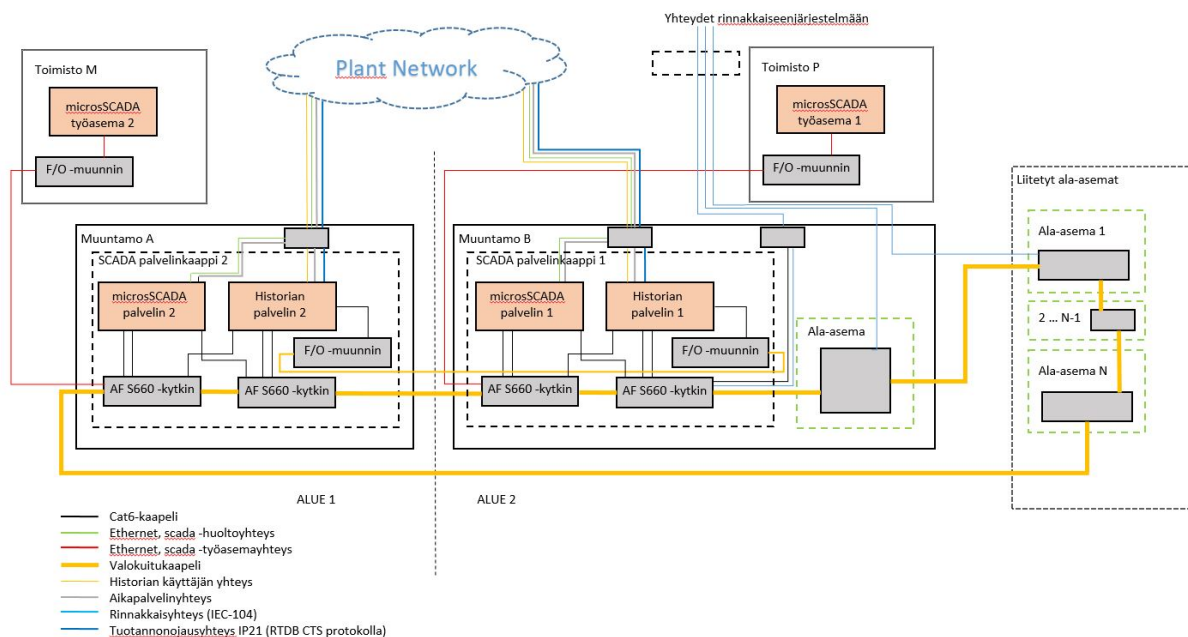
Tämän työn puitteissa pyritään löytämään uusimisen yhteydessä mahdollisia toteutettavia keinoja parantaa laitosten energiatehokkuutta sekä tarjota säästöjä kysynnänjouston avulla.

3.2.3 Borealis Polymers Oyn MicroSCADA

Borealoksen uusi kaukokäyttöjärjestelmä on ABB:n MicroSCADA X. Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla uutta microSCADA-järjestelmää. Borealoksen SCADA-järjestelmään pohjautuva yleinen kaukokäyttö järjestelmän järjestelmäkaavio alaseamatasolla on esitetty kuvassa 9. Kuvasta näkee hyvin kuituverkon silmukkamuodon, jolla toteutetaan kahdennettu tiedonsiirtoyhteys. Kuva osoittaa myös, miten eri yhteydet on toteutettu eri tiedonsiirtomenetelmillä. Borealoksen SCADAssa on tällä hetkellä n. 2000 I/O-pistettä ja alaseamia on noin 25. Määrä tulee karkeasti kaksinkertaistumaan kun järjestelmään liitetään muovitehtaat. SCADA-järjestelmän tiedonsiirtoa esitellään kuvassa 10. Tästä kuvasta nähdään eri järjestelmien välisten yhteyksien muodostuminen. Liitteenä 1 on SCADA-järjestelmän yleisen tason järjestelmäkaavio kokonaisuudessaan.

Koko Borealis-konsernin laajuinen standardi tuotannonohjausjärjestelmä on AspenTechin InfoPlus.21 (IP21). Jokaisen tuotantolaitoksen, ennen kaikkea jatkuvatoimisten prosessien, automaatiojärjestelmä on äärimmäisen tärkeä niiden toiminnan kannalta. Tämän takia siitä pidetään erittäin tiukasti huolta, eikä siihen yleensä päästetä mitään ylimääräistä ulkopuolista järjestelmää osaksi. Tuotantoprosessin ohjaamisen ja energiakulutuksen säätämisen eri ajotavoilla mahdollistamiseksi on Borealiksella kuitenkin tarve saada IP21 järjestelmään reaaliaikaista tietoa sähköenergian kulutuksesta.

Suoraa yhteyttä SCADAn ja IP21 välillä ei siis pystytty järjestämään, mutta tietojen lukeminen historian-tietokannasta onnistuu, kun IP21 varten pystytettiin oma palvelin. Tiedon siirto microSCADAn historian-tietokannasta IP21-järjestelmään tapahtuu OPC-UA protokollaa käyttäen. SCADASTA haetaan tietoja IP21:en ennalta määritellyin aikaväleihin ja tätä tietojen haku väliä voidaan muuttaa vastaamaan tuotannonohjauksen tarpeita.



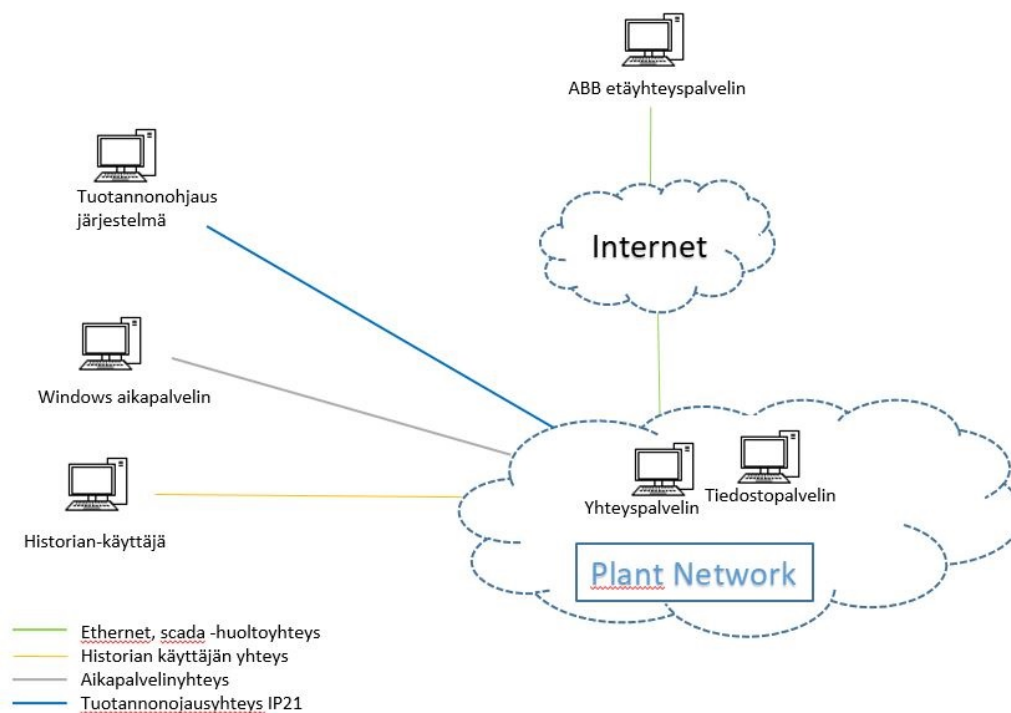
Kuva 9: Borealiksen kaukokäyttöjärjestelmän ala-asematason järjestelmäkaavio

Ennen kaikkea uusi SCADA tarjoaa tuotannon henkilöstölle entistä tarkempaa, tärkeää tietoa laitoksen energian kulutuksesta tosiaikaisesti ilman, että prosessiohjauksjärjestelmän tietoturvallisuus kärsii tarpeettomasti. Uusi järjestelmä takaa myös, että sähkökunnossapidon henkilöstöllä on jatkossakin järjestelmä jolla valvoa ja ohjata sähköverkkoa.

3.3 Kehitysmahdollisuudet kaukokäyttöjärjestelmän uusinnan yhteydessä

Tässä luvussa tarkastellaan eri mahdollisuuksia, joita uuden kaukokäyttöjärjestelmän käyttöönottoprojektin yhteydessä olisi mahdollista toteuttaa. Esitellyt ominaisuudet eivät välttämättä ole uuden järjestelmän mukanaan tuomia, vaan ne olisivat saattaneet olla yhtäläillä toteutettavissa myös vanhalla järjestelmällä. Järjestelmän uusinta on kuitenkin erinomainen tilaisuus tarkastella ja toteuttaa uusia ominaisuuksia kaukokäyttöjärjestelmään. Ensimmäinen kehitys kaukokäyttöjärjestelmän kokonaisuuteen oli energiamittareiden lisääminen. Projektissa lisättiin mittaukset suurimpaan osaan pienjännitekeskuksista, sekä joillekin muiden jännitetasojen suurimmille kuluttajille. Tämän työn puitteissa päivitettiin jo osin vanhentuneita energiamittausten laskentakaavoja, sekä selvitettiin onko verkossa kohteita joihin mittaus kannattaisi lisätä laadukkaana energiakulutuksen raportoinnin ja seurannan varmistamiseksi.

Mittausten lisäys vaati jo itsessään kaukokäyttöjärjestelmän kulutusmittauslaskeutujen uudistamista. Lisäksi energiamittauskaavat olivat monilta osin jo hieman vanhentuneita ja vaativat päivitystä. Tämän diplomityön yhteydessä haastateltiin Borealiksen eri tuotantolaitosten henkilökuntaa ja selvitettiin mittauksen ajantasai-



Kuva 10: orealixen kaukokäyttäjärjestelmän tiedonsiirron järjestelmäkaavio

suutta. Saatujen tietojen pohjalta päivitettiin laskentakaavat vastaamaan verkon nykyistä käyttöä.

Uusien mittauksien lisääminen sopiviin kulutuskohteisiin voi parhaimmillaan mahdollistaa entistä paremman tuotannon optimoinnin ja sitä kautta voidaan saavuttaa merkittäviäkin säästöjä. Borealixen eri tuotantolaitosten prosessit ovat kuitenkin pitkälle optimoituja sen puitteissa mikä on mahdollista. Tuotannon edustajia haastateltaessa selvisi, ettei prosessista heidän näkökulmastaan löydy optimointivaraa sähkönkulutuksen vähentämiseksi. Prosessin optimoinnin parantamiseksi tarvitaan siis lisää sähkönkulutuksen analysointia sekä tiivistä yhteistyötä tuotantoprosessin asiantuntijoiden kanssa.

Haastatteluissa ilmeni yksi selkeä mahdollisuus parantaa tuotantolaitosten energiatehokkuutta. Selvisi että ainakin osalla tuotantolaitoksista on moottoreita jotka käyvät jatkuvasti, vaikka tuotantoprosessi jota ne palvelevat olisi pysähdyksissä. Näiden laitteiden automaattinen pysäytys niiden käydessä tarpeettomina olisi turhan energiankulutuksen poistamista, ja on todennäköisesti mahdollista toteuttaa hyvinkin pienillä taloudellisilla investoinneilla.

Vaikka tuotantoprosessi itsessään on hyvin pitkälle optimoitu, löytyi eri tuotantolaitoksilta jonkin verran kohteita joiden energiatehokkuutta voitaisiin parantaa. Tuotantolaitoksilla on esimerkiksi suorakäyttöisiä moottoreita, joiden energiatehokkuus paranisi, mikäli ne muutettaisiin taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Näiden kohteiden taajuusmuuttajakäyttöön vaihtamisesta ei tämän työn puitteissa tehty kannattavuusarviota, mutta tällaisten kohteiden olemassa olo on nyt tiedossa.

Muun muassa uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä, tarvitaan sähköjärjestelmässä tulevaisuudessa entistä enemmän säätövoimaa. Kun säätövoimaksi soveltuvaa tuotantoa lakkautetaan kannattamattomana, tilanne vaikeutuu. Yksi vaihtoehto järjestelmän tehotasapainon säätöön on kysyntäjousto, kuten luvussa 2.2 on kerrottu. Mikäli Borealiksella on mahdollisuus osallistua kysyntäjoustoan tai reservimarkkinoille, voidaan näillä keinoilla saavuttaa merkittäviäkin taloudellisia säästöjä. Tässä työssä selvitettiin, millaisia laitteita tai laitekokonaisuuksia Borealiksen tuotantolaitoksilta löytyy ja mitkä niiden mahdollisuudet ovat osallistua eri reservimarkkinoille tai kysyntäjoustoan. Luvussa neljä on esitetty alustava kannattavuusarvio osalle potentiaalista kohteista jotka selvityksessä löydettiin.

3.4 Energiatehokkuuden parantaminen

Energiatehokkuutta parantavien kohteiden löytämiseksi haastateltiin Borealiksen eri tuotantoyksiköiden henkilöstöä. Tuotannon henkilöstöllä on hyvä kuva siitä, miten sähköä kulutetaan tuotantolaitoksen eri kohteissa ja toisaalta siitä minkä kohteiden kulutuksesta ei tietoa ole, tai tarkempaa tietoa kaivattaisiin.

Petrokemian osalta energiamittauskaavat olivat jo valmiiksi ajantasaisemmat, eikä suuria muutoksia tarvittu. Energiamittareiden lisäämiselle ei myöskään koettu tarvetta tällä hetkellä. Yksittäisiä suurempia kulutuskohteita ja niiden jyvityksiä eri tuotantolaitosten välillä käytiin läpi ja pyrittiin päivittämään vastaamaan nykytilannetta. Kaiken kaikkiaan petrokemian tuotantolaitosten osalta energiamittaukset, sekä kaukokäyttöjärjestelmän laskentakaavat vaikuttavat olevan riittävän hyvät nykytilassa. Petrokemian tuotantolaitoksilta ei selkeitä prosessin tehostuskeinoja löytynyt, eikä prosessissa juurikaan ole joustovaraa.

Haastatteluissa kävi säännönmukaisesti selväksi, että Borealiksen muovitehtaiden prosessien sähkönkulutuksen säätäminen ei ole kannattava ratkaisu. Paras lopputuotteen laatu saadaan tietynlaisella ajolla, eli energian kulutuksen säätäminen vaikuttaa suoraan lopputuotteen laatuun. Täten prosessin ohjaamisen optimointi energiatehokkuuden parantamiseksi karsiutui pois tämän työn vaihtoehdoista energiatehokkuuden parantamiseksi.

Mittauksia parantamalla ei siis juurikaan saavuteta parannuksia energiatehokkuuteen. Haastatteluissa kuitenkin selvisi yksittäisiä moottoreita jotka saattavat käydä turhaan prosessin ollessa jostain syystä seis. Tuotantolaitoksilta löytyy myös suorakäyttöisiä sähkömoottoreita, joiden energiatehokkuutta voitaisiin parantaa muuttamalla ne taajuusmuuttajakäyttöisiksi.

4 Alustava kannattavuusarvio reservimarkkinoille osallistumisesta

Energiakulutuksen laskentakaavojen päivityksen tarve selvitettiin haastattelemalla Borealiksen eri tuotantolaitosten edustajia. Samassa yhteydessä pyrittiin yhdessä tuotannon edustajien kanssa löytämään laitteita joilla olisi mahdollisuuksia joustaa kulutuksessaan ja osallistua reservimarkkinoille. Löydetyistä kohteista valittiin sopivimmilta vaikuttavat kohteet ja niistä tehdään tässä luvussa alustava kannattavuusarvio. Tämän arvion tarkoituksena on antaa kuva siitä, minkä suuruisista taloudellisista hyödyistä eri vaihtoehtojen kohdalla puhutaan.

Luvussa 2.3 käsiteltiin sähkön kulutuksen tulevaisuuden näkymiä Suomessa ja luvussa 2.4 pohjoismaisia sähkömarkkinoita. Näiden pohjalta todettiin, että säätöön kykenevää tuotantoa tai kulutusta tarvitaan tulevaisuudessa entistä enemmän. Säätövoimaksi soveltuva tuotanto kuitenkin vähenee koko ajan, joten säätöön kykeneville kuormille on entistä enemmän kysyntää.

Luvussa 4.1 tarkastellaan lähemmin Borealiksen Polypropeenilaitoksen mahdollisia reservimarkkinoille myytäviä kulutuskohteita. Luvussa 4.2 tehdään vastaava tarkastelu Polyeteeni 2 -laitoksella sijaitsevalle kuormalle joka voisi sopia reservimarkkinoille.

Fingridin esimerkit ansaintamalleista on esitetty luvussa 2.2.3. Seuraavassa on esitetty yhteenveto reservimarkkinoista joille Polypropeenitehtaan, sekä Polyeteeni 2 -tehtaan valikoidut kuormat voitaisiin mahdollisesti myydä.

Odotettavissa oleva uusiutuvien energiantuotantomuotojen lisääntyminen tarkoittaa myös kasvavaa tarvetta reservisähkölle. Myös ydinvoiman osuuden lisääntymisen on todettu kasvattavan säätövoiman tarvetta. Tämän seurauksena on oletettavissa, että hinnat eivät ainakaan laske reservimarkkinoilla, vaan päinvastoin tulevat todennäköisesti nousemaan. Täten nykytiedoilla tehtävät arviot mahdollisista tuotoista reservimarkkinoilla voidaan kohtalaisella varmuudella olettaa pätevän myös tulevaisuudessa, riippumatta esimerkiksi sähköenergian hinnan muutoksista.

4.1 Polypropeenilaitoksen ekstruderit

Borealiksen polypropeenita tuottavalla laitoksella on kaksi kappaletta 3,2 MW tehoisia ekstrudereita. Lisäksi kummallakin ekstruderilla on apunaan 450 kW moottorit, jotka ovat toiminnassa aina samaan aikaan ekstruderin kanssa. Teho, joka ekstrudereiden käyttöä joustamalla voitaisiin myydä, on siis 3,65 MW ekstruderia kohden. Lisäksi on mahdollista pysäyttää myös yksi 710 kW moottori. Näiden yhteisteho on siis 8,01 MW.

Polypropeenilaitoksen ekstruderit ja moottorit ovat pysäytettävissä minuuteissa. Tämä rajaa mahdollisuudet reservimarkkinoille osallistumisesta ainoastaan säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoihin (mFRR). Säätösähkömarkkinoille vähimmäiskapasiteetti on 5 MW, mutta se edellyttää että säätötarjous voidaan tilata elektronisesti. Mikäli suunnittelun ja automatisoinnin avulla päästäisiin 30 sekunnin aktivoitumisaikaan, saattaisi se mahdollistaa osallistumisen myös reservimarkkinalle Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR).

Polypropeenilaitos saa raaka-aineensa olefinintuotantolaitokselta, joka valmistaa propeenaa. Propeenin tuotantoprosessia ei voida keskeyttää, joten polypropeenilaitoksen ekstrudereiden poissa käytöstä olo aikaan vaikuttaa propeenin varastoinnin kapasiteetti. Polypropeenin tuotannon edustajan arvio oli, että täysin tyhjiin propeeni säiliöiden täytyminen tapahtuu noin tunnissa. Hyvin ennakkoon suunnitellen voidaan ekstruderit siis pysäyttää maksimissaan yhdeksi tunniksi. Todennäköisesti markkinoille keskimäärin myytävä aika olisi hieman tätä lyhyempi, jotta säätövaraa jää. Tässä arvioinnissa on kuitenkin käytetty yhden tunnin pysäytys aikaa.

Tuotannon edustajan arvio summasta, jolla tunnin keskeytys olisi kannattavaa, oli n. 20000 euroa. Jotta säätösähkömarkkinoilla päästäisiin tämän suuruisiin tuottoihin pitäisi säätösähkön hinnan olla 2500 euroa / MWh. Vuonna 2021 säätösähkön tarjoushinnan maksimi on 5000 euroa, eli hinnat voivat kyllä olla säätösähkömarkkinoilla hyvin korkeita. Esimerkiksi suuren voimalaitoksen pudotessa verkosta Suomen ollessa eriytynyt omaksi hinta-alueeksi, voi hinta nousta maksimiinsa, sillä Fingrid joutuu aktivoimaan kaikki mahdolliset kotimaiset reservit.

Tällaisella usean tuhannen euron hinnalla säädön aktivoituminen olisi luultavasti erittäin harvinaista. Esimerkiksi vuonna 2020 säätösähkön keskihinta oli 38,36 euroa / MWh. Kyseisenä vuonna ylössääötötarjousten maksimi hinta oli 3500 euroa / MWh ja tämä myös oli säätösähkön hinta kahtena tuntina. Lisäksi kaksi tuntia hinta oli 2999 euroa / MWh, mutta nämä olivat peräkkäiset tunnit joten polypropeenilaitos ei voisi molemmille osallistua.

Jos polypropeenitehtaan 8 MW olisi vuonna 2020 tarjottu säätösähkömarkkinoille 2500 euron hintaan, olisi keskeytyksiä tullut kolme. Olettaen että tilattu säätö olisi ollut koko tunnin mittainen olisi tuottoa tullut kolmesta keskeytyksestä yhteensä 60000 euroa.

Yksi yllämainituista tunneista oli 16.4.2020 klo 14-15. Tällöin säätösähkön hinta oli 3500 euroa ja aktivoitu teho 15 minuutin ajanjakson lopussa on esitetty taulukossa 2. Vaihtelu aktivoituneen säädön määrässä viittaa siihen, että kaikkia tarjouksia ei ole hyväksytty koko tunnille.

Taulukko 2: Esimerkki yhden tunnin säätötehon aktivoitumisesta

| Alkuaika | Loppuaika | MW |
|---------------------|---------------------|-----|
| 2020-04-16 14:00:00 | 2020-04-16 14:15:00 | 114 |
| 2020-04-16 14:15:00 | 2020-04-16 14:30:00 | 542 |
| 2020-04-16 14:30:00 | 2020-04-16 14:45:00 | 612 |
| 2020-04-16 14:45:00 | 2020-04-16 15:00:00 | 612 |

Alustavien arvioiden mukaan säätösähkömarkkinoille osallistuminen on siis kannattavaa. Tarkempaa tutkimusta tarvitaan siitä, mitkä ovat todelliset kustannukset keskeytystä kohden, ja millä hinnalla kohteita kannattaa tarjota markkinoille. Myös muita markkinoille osallistumisen kustannuksia täytyy selvittää, kuten tuotannon suunnittelusta koituvat lisäkustannukset sekä Fingridin vaatimien säätökokeiden aiheuttamat kustannukset. Huomioitavaa on myös se, että Fingridin lähettämä säädön tilaus voi olla lyhimillään yhden minuutin mittainen

4.1.1 Polyeteeni 2 -laitoksen ekstruuderit

Borealisen polyeteenitehtaalla on 5 MW tehoinen ekstruuderit, joka voitaisiin pysäyttää lyhyeksi ajaksi (enintään muutama tunti). Säättökohde soveltuu kokonsa puolesta kaikkiin reservimarkkinatuotteisiin, joten rajoittava tekijä on reagointi aika, sekä se ettei kohde kykene reservin näkökulmasta alassäätöön, eli lisäämään kulutustaan. Näiden kriteerien perusteella tilanne on kuitenkin sama kuin Polypropeenitehtaalla, eli kohteita voidaan tarjota ainoastaan säätösähkömarkkinoille.

Polyeteeni 2 -laitoksen tuotannon edustaja arvio kannattavuutta selkeästi korkeammalle kuin Polypropeenilla. Kun huomioidaan vielä tarjottavan kohteen pienempi kapasiteetti, ei edes säätösähkön maksimihinnalla 5000 euroa /MWh saada riittävän suuria tuottoja. Mikäli tuotannon edustajan alustava arvio vastaa todellista kannattavuutta, ei laitoksen kannata tarjota kuormaa säätösähkömarkkinoille.

5 Johtopäätökset

Alustavan kannattavuus arvion perusteella Polypropeenitehtaan olisi kannattavaa tarjota 8 MW sähkömoottorikuorma säätösähkömarkkinoille. Kuorma tulisi hinnoitella melko kalliiksi jolloin aktivoitumisia tulisi vähän. Mikäli säätötilaukset ovat lähempänä yhtä tuntia kuin vähimmäismäärää eli yhtä minuuttia, yksittäisestä aktivoinnista saataisiin hyvät tuotot.

Lisää tutkimusta tarvitaan markkinoille osallistumisen aiheuttamista kustannuksista, sekä tarkempaa selvitystä mahdollisista tuotoista. Mikäli tämä tarkempi taloudellinen arvio näyttää reservimarkkinoille osallistumisen edelleen olevan kannattavaa, on syytä tehdä tarkempaa tutkimusta myös eri tuotantoyksiköiden joustomahdollisuuksista. Tehtailla on paljon potentiaalia joustaa ja tuotot voivat olla suuriakin.

Tehtyjen haastattelujen perusteella prosessit eivät suoraan pysty nopeampaan joustoon. Mikäli kuitenkin nopeampi säätömahdollisuus voidaan esimerkiksi automatisoinnin avulla ja prosessin ajoa suunnittelemalla mahdollistaa, voidaan kysyntäjouston taloudellisia hyötyjä mahdollisesti parantaa entisestään. Myös sähkösaattolämmitykset tarjoavat teknisesti erittäin mielenkiintoisen joustopotentialin. Lisätutkimus näistä aiheista onkin mielestäni täysin perusteltua.

Tutkittujen kulutuskohteiden osallistuminen muille reservimarkkinoille kuin säätösähkömarkkinoille ei ollut mahdollista. Tuotantolaitoksen eri kuormia voi kuitenkin olla kannattavaa tutkia, ja selvittää niiden mahdollisuuksia eri reservimarkkinoille.

6 Lähdeluettelo

1. Kilpilahti [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa: <https://www.kilpilahti.fi/kilpilahti/>
2. Veolia Kilpilahti [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa: <https://www.veolia.fi/kilpilahti>
3. Kilpilahti, Neste Oyj [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa <https://www.kilpilahti.fi/yritys/neste-oyj/>
4. Muttonen K. Suljetun sähköjakeluverkon regulaatio teollisuusympäristössä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, School of Energy Systems. Lappeenranta, 2015 Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015111617191>
5. Aurora Kilpilahti, Historia [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa: <https://aurorainfrastructure.com/fi/yritys/historia/>
6. Elovaara J. Haarla L. Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto 2011, 520 s. ISBN 978-951-672-360-3
7. Lakervi E. Partanen J. Sähköjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto, 2009. 296 s. ISBN 978-951-672-359-7
8. Fingrid. Tasehallinta [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasehallinta>
9. Fingrid. Johdanto sähkömarkkinoihin, Fingrid [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>
10. Energiavirasto. National Report to the Agency for the Cooperation of Energy Regulators and to the European Commission Year 2020, Energiavirasto, 2020
11. Energiateollisuus ry. Sähkömarkkinat [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021].
<https://energia.fi/energiapolitiikka/sahkomarkkinat>
12. Fingrid. Reservilajit, Fingrid [verkkoaineisto]. [viitattu 30.7.2021]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservilajit>
13. Pihala H. Farin J. Kärkkäinen S. Sähkön kysyntäjouaston potentiaalikartoitus teollisuudessa. VTT 2005
14. Seppälä J. Savolainen H. Sironen S. Soimakallio S. Ollikainen M. PÄÄSTÖVÄHENNYSPOJKU KOHTI HIILINEUTRAALIA SUOMEA – HAHMOTELMA, 2019
15. Huttunen R. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategias- ta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, ISBN 978-952-327-190-6
16. Rinne E. Holttinen H. Kiviluoma J. Rissanen S. Effects of Turbine Technology and Land Use on Wind Power Resource Potential. Nature Energy, 2018. doi:10.1038/s41560-018-0137-9.
17. Käsälä K. Hammer K. Säättövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle, VTT 2018
18. Kumpulainen L. Rinta-Luoma J. Voima S. Kauhaniemi K. Sirviö S. Koivisto-Rasmussen R. Valkama A. Honkapuro S. Partanen J. Lassila J. Kaipia T. Haakana J. Annala S. Järventausta P. Valkealahti S. Repo S. Verho P. Suntio T. Rautiainen A. Nikander A. Pakonen P. Roadmap 2025: Sähkömarkkina- ja verkkovisio 2035 Roadmap 2025
19. Elovaara J. Haarla L. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet.

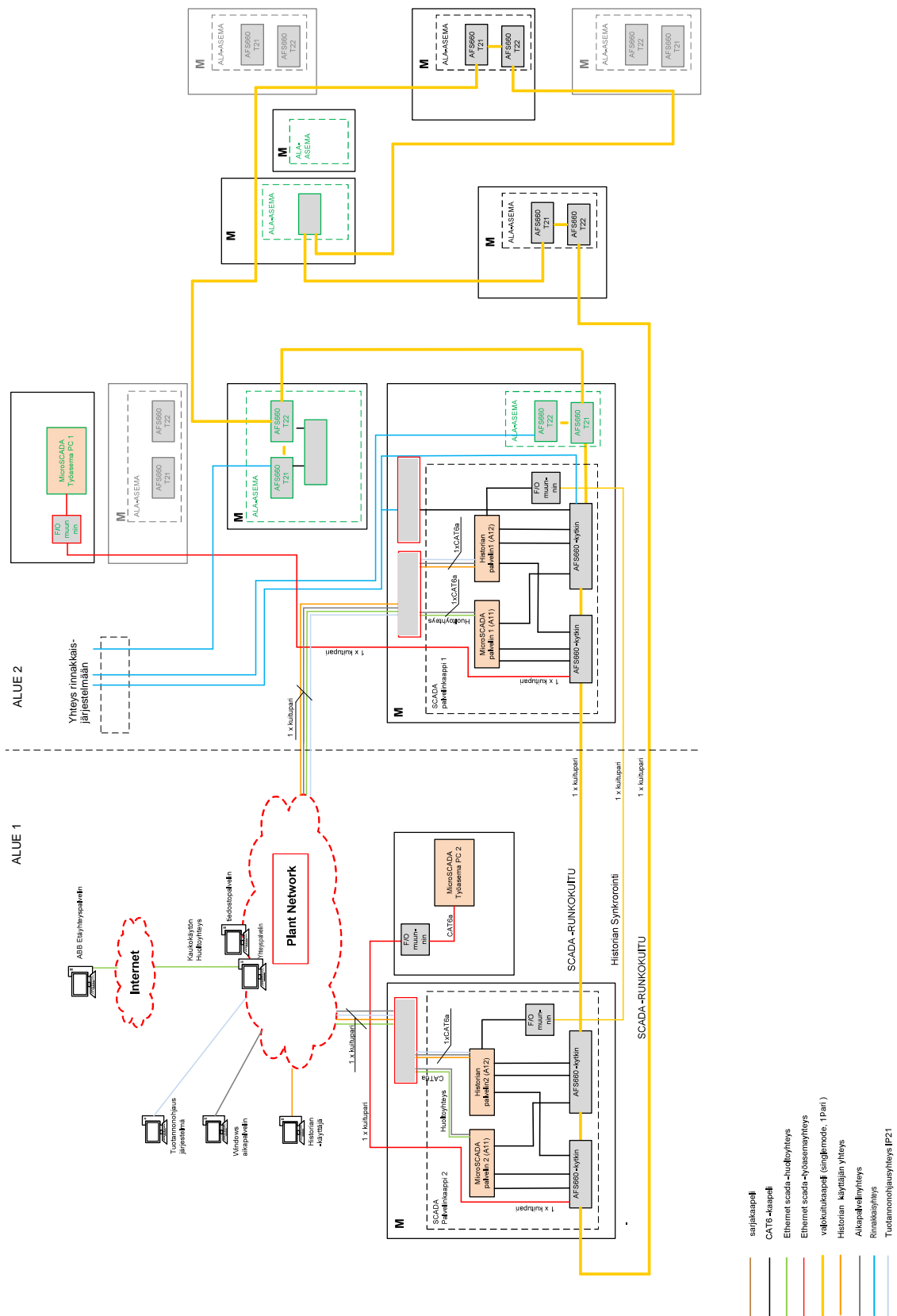
Helsinki: Otatieto, 2011. 522 s. ISBN 978-951-672-363-4

20. Etto J. Prosessisähköistyksen kunnossapito, osa 2. Kunnossapito lehden erikoisliite: Kunnossapito koulu, N:o 48, 1998.

21. Bailey D. Wright E. Practical SCADA for Industry, 2003 ISBN 978-0-7506-5805-8, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5805-8.X5000-4>

7 Liitteet

1. SCADA järjestelmäkaavio



Kuva 11: Liite 1. SCADA järjestelmäkaavio