

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Anssi Vanhatalo

**JÄNNITTEENSÄÄDÖN MAHDOLLISUUDET KYSYNTÄJOUSTOSSA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 8.5.2019

Työn valvoja

Professori Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Tomi Hakala

Työn tarkastaja

Professori Hannu Laaksonen

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty sähkönjakeluverkkoyhtiö Elenia Oy:lle. Työn valvojana toimi professori Kimmo Kauhaniemi Vaasan yliopistolta. Haluan kiittää Kimmoa työn tarkastamisesta, kommentaista sekä näkökulmista työhöni.

Suuret kiitokset työn aikaisesta tuesta kuuluu Elenian ohjaajalleni Tomi Hakalalle asiantuntevista ja kannustavista neuvoista työn toteutuksen aikana. Kiitokset kuuluvat myös muille Elenialaisille, jotka ovat antaneet asiantuntijanäkökulmaa, tukea sekä luoneet loistavan työilmapiirin. Diplomityön aihe oli itselleni mielenkiintoinen sekä yhteiskunnallisesti ajankohtainen.

Erityiskiitokset haluan osoittaa kavereilleni sekä perheelleni heidän antamastaan tuesta koko opintojeni ajan.

Tampereella, 8.5.2019

*Anssi Vanhatalo*

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	1
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tausta ja tavoite	9
1.2 Työn rakenne	10
1.3 Elenia Oy	11
2 SÄHKÖNJAKELU JA SÄHKÖJÄRJESTELMÄ	13
2.1 Sähkönjakelujärjestelmä	14
2.2 Tehotasapaino	16
2.3 Sähkön laatu	17
2.4 Jännitteensäätö	19
2.5 Kuormien jänniteriippuvuus	22
2.6 Loisteho	25
2.7 Sähkömarkkinat	28
3 KYSYNTÄJOUSTO	31
3.1 Perinteinen kysyntäjousto	34
3.1.1 Joustokohteet	35
3.1.2 Kulutuksen jakautuminen	36
3.2 Kysyntäjouston kehityssuunnat	38
3.3 Kysyntäjousto markkinoiden näkökulmasta	40
3.4 Jännitteensäädöllä toteutettu kysyntäjousto	41

4	JÄNNITTEENSÄÄDÖN TOTEUTUKSIA	43
4.1	Kysyntäjoustoon osallistuminen jännitteensäädöllä	44
4.2	Referenssit muualla	45
4.2.1	Case I	46
4.2.2	Case II	47
4.2.3	Case III	48
4.2.4	Case IV	49
4.2.5	Case V	50
4.3	Yhteenveto tarkastelluista referensseistä	51
5	TEHDYT LASKELMAT JA TESTAUKSET	53
5.1	Sähköverkkolaskenta	53
5.2	Kulutusprofiilit	58
5.3	Jännitteensäädön vaikutuksen testaus – Jyrängön sähköasema	59
5.4	Testaukset eri vuodenaikoina – 4 uudempaa sähköasemaa	63
5.5	Loisteho	65
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
6.1	Testauksista saadut tulokset	67
6.1.1	Vaikutukset pätotehoon	68
6.1.2	Vaikutukset loistehoon	70
6.2	Tekninen toteutus	72
6.3	Markkinapotentiaali	74
7	YHTEENVETO	75
	LÄHDELUETTELO	78



## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Symbolit*

$B$	Suskeptanssi
$E$	Energia
$I$	Virta
$I_p$	Kuormitusvirran pätökomponentti
$I_q$	Kuormitusvirran loiskomponentti
$j$	Imaginääriyksikkö
$P$	Pätöteho
$Q$	Loisteho
$R$	Resistanssi
$S$	Näennäisteho
$t$	Aika
$U$	Jännite
$U_d$	Jännitteenalenema
$X$	Reaktanssi
$Z$	Impedanssi

$\alpha$  Verrannollisuus

$\Delta$  Muutos

$\delta$  Kulmaero

$\theta$  Vaihekulma ( $^{\circ}$ )

$\varphi$  Vaihekulma ( $^{\circ}$ )

*Lyhenteet*

AMR Automatic Meter Reading, automaattinen mittarinluenta

CVR Conservation Voltage Reduction, jännitteensäädön tehokkuus

DMS Distribution Management System, käytöntukijärjestelmä

IEC International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio

KJ Keskijännite

NIS Network Information System, verkkotietojärjestelmä

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä

PJ Pienjännite

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Anssi Vanhatalo
<b>Diplomityön nimi:</b>	Jännitteensäädön mahdollisuudet kysyntäjoustopotentialissa
<b>Valvoja:</b>	Professori Kimmo Kauhaniemi
<b>Ohjaaja:</b>	Diplomi-insinööri Tomi Hakala
<b>Tarkastaja:</b>	Professori Hannu Laaksonen
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2013
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2019

**Sivumäärä: 92**

---

**TIIVISTELMÄ**

Nykyään sähköjärjestelmässä uusiutuvien energialähteiden osuus on kasvanut, kun taas perinteiset säätövoimaan käytetyt voimalaitokset ovat menettäneet kannattavuuttaan. Tuotantovaihteluiden kasvaessa ja säätövoimakapasiteetin vähentyessä onkin tärkeä kehittää uusia ratkaisuja tehotasapainon hallintaan. Tyypillisesti kysyntäjoustopotentialilla tarkoitetaan kulutuksen ohjausta päälle tai pois tehotasapainon sekä järjestelmän taajuuden hallitsemiseksi. Vaihtoehtona tälle voisi olla jännitteensäädöllä toteutettu kysyntäjoustopotentiali. Tällöin yksittäisiä kulutuskohteita ei kytkettäisi päälle tai pois vaan kysyntäjoustopotentialin suuruus riippuisi kulutuksen jänniteriippuvuudesta. Jakeluverkon jännitteen muutoksella voidaan vaikuttaa suureen määrään kuluttajien kuormituksia.

Tämän työn tärkeimpänä tavoitteena on selvittää tekniset mahdollisuudet jännitteensäätöön sekä selvittää, millainen kysyntäjoustopotentiali Elenian verkkoalueella on saavutettavissa. Jakeluverkkoyhtiön mielenkiinnon kohteena ovat myös säästöt loistehomaksuissa jännitteensäädöllä. Työssä analysoidaan jännitteensäädöllä toteutettavan kysyntäjoustopotentialin käyttöönottoa pääosin teknisestä näkökulmasta ja pohditaan etäluettavien sähkömittareiden hyödyntämistä toteutuksessa. Työssä ei oteta kantaa sähkömarkkinalakiin ja lain vaikutuksiin jännitteensäädön tarjoamisessa sähkömarkkinoille.

Tavoitteiden saavuttamiseksi perehdyttiin markkinoilla oleviin jännitteensäädön toteutuksiin sekä tutkittiin jännitteensäädön vaikutuksia tehoihin testauksissa. Testaukset suoritettiin ohjaamalla muuntajien käämikytkimiä asetellusta jännitetason ohjeavovasta uuteen arvoon. Testausten perusteella tutkittiin kuormitusten jänniteriippuvuutta ja jännitteensäädöllä saatavia vaikutuksia tehoihin eli jännitteensäädön kysyntäjoustopotentialia.

Työn tuloksena muodostettiin erilaisten kulutusprofiilien omaavien sähköasemien perusteella kokonaisjoustopotentiali Elenian verkkoalueelta. Käämikytkimen askelluksella saatiin vaikutettua tehoihin keskimäärin 1,85 %, joten koko verkkoalueelta voitaisiin saada yhteensä noin 15 MW:n säätöpotentialia alaspäin ja noin 24 MW:ia ylöspäin. Lisäksi havaittiin, että jakeluverkkoyhtiön maksamia loistehomaksuja voitaisiin pienentää jännitteensäädöllä.

---

**AVAINSANAT:** Kysyntäjoustopotentiali, jännitteensäätö, sähköjakelu



---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

<b>Author:</b>	Anssi Vanhatalo
<b>Topic of the Thesis:</b>	Potential of voltage control in demand response
<b>Supervisor:</b>	Professor Kimmo Kauhaniemi
<b>Instructor:</b>	Master of Science in Technology Tomi Hakala
<b>Evaluator:</b>	Professor Hannu Laaksonen
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2013
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2019

**Pages: 92**

---

**ABSTRACT**

The power balance of the grid forms one of the cornerstones of electricity transmission. In this context, the term demand response is used to refer to adaptation of electricity demand to the disposable power. As power fluctuations are extremely typical especially for renewable energy sources, it is not profitable to invest in traditional balancing power nowadays. Thus, a seek of new, alternative solutions for retaining the power balance, is an important area of research. One potential option for controlling the power balance in the grid is load balancing through voltage control.

Changes in the grid have a potential to affect large amount of customers, like small changes could collect large adjustment potential. Consequently, the main aim of this thesis, is to determine the technical prerequisites for voltage control, and to ascertain realistic and achievable demand response potential in Elenia's power grid. Voltage control allows impacting on the power consumption. Hence, electricity distribution companies are increasingly interested in the possible savings in reactive power fees. For this thesis, an analysis of achievable voltage control, including exploitation of AMR-meters; and its impact on the response demand is performed. The possible impact of the Finnish Electricity Market Act in demand response, is however out of the scope of this thesis.

To achieve the goals, the existing models were investigated for implementation of voltage control. In addition, the affect on power for voltage control was researched. The tests were performed in the control center, by adjusting the on-load tap changer of the transformer, from reference voltage level to another. These tests were carried out during different time of year, in order to determine the impact of varying load levels on voltage control. Based on the testing, the achievable impact on the power could be estimated. Based on different substations with different consumption profiles, a total flexibility potential was estimated in the Elenia's grid. With a tap-changer step, the power was on average affected by 1,85 %, hence a total potential is 15 MW for the entire grid. In addition, by means of voltage regulation, the potential affect on the reactive power charges was detected.

---

**KEYWORDS:** Demand response, voltage control, electricity distribution

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta ja tavoite

Elämme energiamurroksen aikakaudella, jolla tarkoitetaan ilmastoystävällisempien ratkaisuiden yleistymistä sähköntuotannossa. Nykyisin tällaiset ratkaisut voivat taas aiheuttaa haasteita sähköjärjestelmän stabiiliuteen. Suomessakin energiatuotannon sekä kulutustottumuksien muuttamiseksi on rakennettava uusia toimintamalleja kestävämpien ympäristönäkökulmien purkamiseksi. Uusiutuvan energian lisääntyessä Suomen energiantuotannossa, säätövoiman tärkeys kasvaa. Uusiutuvan energiantuotannon ennustamisen vaikeus aiheuttaa haasteita tasapainon säilyttämiseen. Sähköverkon toiminta perustuu sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainoon eli joka hetki niiden on vastattava toisiaan. Jatkuva kulutuksen kasvaminen on vaatinut uutta sähköntuotantokapasiteettia markkinoille. Lisäksi sähkön kulutushuiput ovat lisääntyneet vuosikymmenien ajan, nostaten sähköenergian hetkellistä hintaa. (Fingrid 2018a, Kivimaa 2016.)

Fossiilisten sähköntuotantolaitosten vähentyminen ilmastopolitiikan ja korkeiden käyttökustannuksien vuoksi ovat heikentäneet tehtasapainon pysyvyyttä. Sähkömarkkinoilla onkin alettu etsiä uusia keinoja tehtasapainon säilyttämiseen, joista on kehittynyt ajatus kysyntäjouston. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan kysynnän sopeutumista sen hetkiseen tuotantomäärään. Teollisuudella on ollut tapana jo ennestään säädellä kulutustaan sekä seurata sähkön markkinahintaa. Esimerkiksi kulutusta on siirretty tunneille, jolloin sähkön tuntihinta on edullisempaa.

Teollisuuden kulutus on ollut vuonna 2017 47 % kokonaissähkönkulutuksesta. Markkinoilla on havahduttu siihen, että asuminen ja palvelut muodostavat toisen suuren kulutuserän. Asumisen ja maatalouden osuus on 28 % sekä palveluiden ja rakentamisen 22 % kokonaiskulutuksesta. (Energieollisuus 2018). Kohteet ovat vain huomattavan pieniä, mutta määrällisesti muodostavat suuria kokonaisuuksia. Ongelmana on ollut kehittää kustannustehokas menetelmä tuomaan pienet kulutuskohteet kysyntäjouston kautta markkinoille.

Seuraavat kolme seikkaa tukevat kysyntäjoustoja sähkövoimajärjestelmässä (SEDC 2017):

- Sähköä ei voida varastoida suuria määriä taloudellisesti kannattavalla tavalla, joten tuotannon ja kulutuksen tasapainoon on kiinnitettävä huomiota.
- Verkossa tapahtuu muutoksia koko ajan, kuten päivä-, tunti- ja sekuntitasolla. Tuotanto ja kulutuskohteet voivat myös vaihdella yllättävän nopeasti ja odottamattomasti aiheuttaen epätasapainoa.
- Sähköjärjestelmät ovat erittäin pääomavaltaisia, investoinnit ovat pitkäkestoisia sekä taloudelliset elinajat ovat pitkiä, joten esimerkiksi tuotannon lisärakentaminen on haastavaa.

Tässä työssä on tarkoituksena tutkia, että onko jännitteensäätö potentiaalinen tapa toteuttaa kysyntäjoustoja. Jakeluverkkoyhtiöt hallitsevat keskijännitesähkönjakelua sekä jakelumuuntajien kautta pienjänniteverkkoa, jolla tavanomaisille kuluttajille tarjotaan liittymäyhteys sähköverkkoon. Keskitetyllä jännitesäädöllä on mahdollista vaikuttaa samanaikaisesti suureen määrään kuluttajia ja näiden kuormitusten kuluttamaan tehoon, joka riippuu kuormitusten jänniteriippuvuudesta.

Tämän työn tärkeimpänä tavoitteena on selvittää tekniset mahdollisuudet jännitteensäätöön sekä selvittää millainen kysyntäjoustopotentiaali Elenian verkkoalueella on saavutettavissa jännitesäädön avulla. Työssä rajoitutaan tarkastelemaan kysyntäjoustopotentiaalin toteuttamista tekniseltä näkökohdalta, eikä oteta kantaa niinkään lakitekniisiin seikkoihin, kuten kuka voi myydä joustoja markkinoille.

## 1.2 Työn rakenne

Tämän diplomityön luvussa 2 käydään läpi Suomen sähköjakelujärjestelmää, jännitesäädön menetelmiä sekä sähkömarkkinoita. Luvussa 3 perehdytään kysyntäjousto-

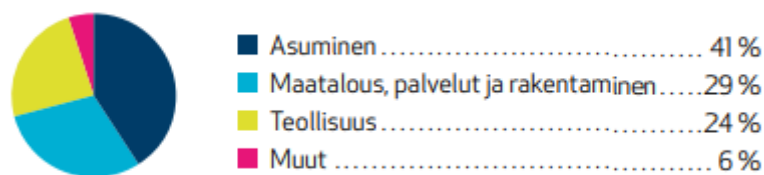
liittyvään terminologiaan. Luku 4 sisältää alustavaa tutkimusta käytännön kokeista sekä käytännön toteutuksista jännitteensäädössä. Luvussa 5 suoritetaan verkostolaskentaa sekä käytännön testauksia että arvioidaan muuttuneita tehoja jännitteensäädön seurauksena. Luvussa 6 esitetään tutkimuksessa saadut tulokset sekä johtopäätökset. Yhteenveto on luvussa 7.

### 1.3 Elenia Oy

Diplomityö tehtiin sähköverkkoyhtiö Elenia Oy:lle, joka on Suomen toiseksi suurin jakeluverkkoyhtiö 12 % markkinaosuudella. Yhtiö toimittaa sähköä yli 430 000 asiakkaalle toimialueena Kanta- ja Päijät-Häme, Pirkanmaa, Keski-Suomi ja Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla, kuten kuvassa 1 on esitetty. Elenian sähköjakelun määrä vuonna 2017 oli yli 6300 GWh. Suomen kokonaiskulutuksen ollessa 85 TWh luokkaa, vastaa Elenia energian osalta yli 7 % Suomen sähköjakelusta. Elenialla on 137 sähköasemaa ja yli 750 erilaista keskijännitejohtolähtöä. Kuvassa 2 on esitetty kulutuksen jakautuminen Elenia verkkoalueella eri kulutustyyppien perusteella. (Elenia 2017b; Energiategollisuus 2018.)



Kuva 1. Elenian verkkoalue.



Kuva 2. Energian kulutuksen hajautuminen eri kuluttajaryhmien välille (Elenia 2017b).

Elenian toiminnan aloittaminen juontaa juurensa kauppaan Vattenfallin kanssa, jossa Elenialle myytiin Suomesta sähköverkko- ja lämpöpalvelut vuonna 2012. Nykyään Elenia konsernilla on työntekijöitä lähes 350 henkeä, jotka toimivat Elenia Oy:n, Elenia Palvelut Oy:n tai Elenia Finance Oyj:n alaisuudessa. (Elenia 2019, Elenia 2017b.)

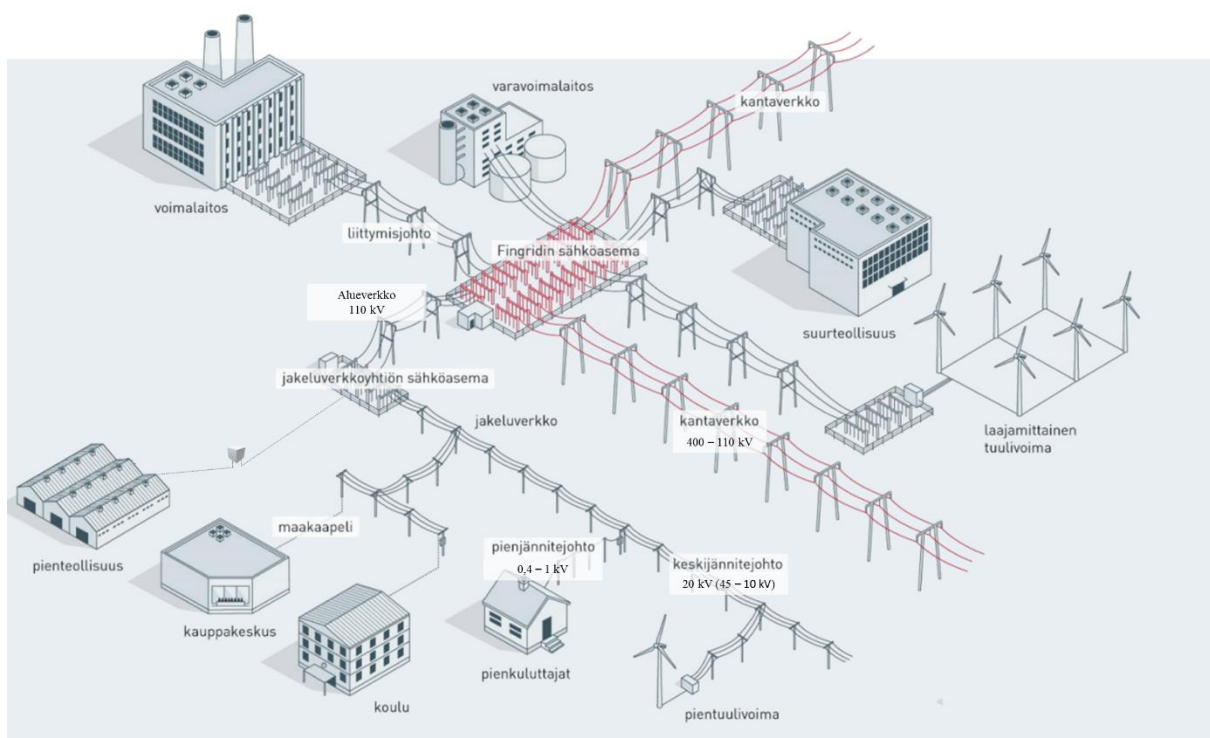
Elenian tärkeimpiä kulmakiviä ovat rohkeus uudistua ja olla kehityksen kärjessä lukuisilla palveluillaan ja ratkaisullaan. Vuodesta 2009 lähtien Elenia on rakentanut vain maakaapeliverkkoa. Nykyään säävarmaa maakaapeliverkkoa rakennetaan noin 3000 km vuositain. Tavoitteena on nostaa verkon kaapelointiaste 75 % vuoden 2028 loppuun mennessä. Elenia omistaa 72 000 kilometriä sähköverkkoa, josta vuoden 2019 alussa oli kaapeloituna 45 %. Siten vuosittainen verkkorakenteen muutos vastaa 4 % kokonaissähköverkon osuudesta. Lisäksi yhtiö on keskittynyt verkostoautomaattioratkaisuiden kehittämiseen, kuten automaattiseen vianrajaukseen sekä uuden sukupolven AMR-mittareiden määrittelyyn. (Elenia 2019.)

Säävarmahanke tukee sähkömarkkinalain muutosta vuonna 2013, jolloin tiukennettiin sähköjakeluverkon toimitusvarmuusvaatimuksia. Laissa määriteltiin, ettei asemakaava-alueella myrskyn tai lumikuorman seurauksena saisi aiheutua asiakkaille yli 6 tunnin keskeytyksiä. Kun taas asemakaava-alueen ulkopuolella maksimi aika saisi olla enintään 36 tuntia. (Elenia 2019, Sähkömarkkinalaki 2013.)

## 2 SÄHKÖNJAKELU JA SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Suomen sähköjärjestelmä koostuu 3-vaiheisesta sähkönsiirrosta 50 Hz taajuudella. Jännite ilmoitetaan yleensä pääjännitteen arvona, joka on kahden vaiheen välinen potentiaalierotus. Sähkön tuottajat ja kuluttajat ovat Suomessa kytketty yhteiseen sähköverkkoon. Sähköenergia on tarkoitettu siirtämään tuotantolaitoksilta mahdollisimman pienillä häviöillä kuluttajille. Siirtoetäisyydet ovat yleensä pitkiä, jolloin hyödynnetään erilaisia jännitetasoja siirtoyhteyksissä. (Elovaara & Haarla 2011: 54-57.)

Suomen sähköjakelu perustuu Fingridin omistamaan kantaverkkoon, johon kuuluvat 400 kV – 110 kV osuudet. Tosin 110 kV jakelusta ainoastaan se osa, jolla voidaan muodostaa silmukkaverkko korvaamaan 400 kV johdon vikaantuminen, on Fingridin omistuksessa. Alueverkot koostuvat 110 kV siirtoverkoista. (Elovaara & Haarla 2011: 58-61.) Paikalliset jakeluverkot siirtävät sähköenergian loppukäyttäjille, ja hallinnoivat keskijänniteverkkoa 20 kV sekä pienjänniteverkkoa 0,4 kV. Lisäksi jakeluverkkoyhtiöt voivat omistaa myös 110 kV johtoja. Keskijännitejakeluun kuuluu myös 45 kV, 33 kV ja 10 kV jännitetasot, jotka ovat harvinaisempia verrattuna 20 kV tasoon. Pienjänniteverkossa voi olla myös käytössä 1 kV ja 0,69 kV jännitteitä. Kuvassa 3 on esitetty tarkemmin sähköjakeluketju. Energiavirasto on määrittänyt kullekin maantieteelliselle alueelle tietyn verkko-yhtiön, jonka vastaa sähköjakelusta sillä alueella. Toiminnan ollessa monopoli-asemassa, on liiketoiminta tarkasti säädeltyä. (Lakervi & Partanen 2009: 11, 19.)



Kuva 3. Sähkönjakeluverkon rakenne (Fingrid 2018b).

Seuraavissa aliluvuissa perehdytään sähkönjakeluun sekä sähköjärjestelmiin, jotka ovat keskeisesti läsnä jännitteensäädössä sekä kysyntäjoustossa.

## 2.1 Sähkönjakelujärjestelmä

Sähkönjakeluverkon tärkeimmät tavoitteet ovat (Elovaara & Haarla 2011: 73):

- Luotettavuus: sähkönjakelun toimittaminen on varmistettava ja vältettävä keskeytyksiä.
- Turvallisuus: sähköverkko ei saa aiheuttaa vaaraa ihmiselle tai omaisuudelle eikä vaikuttaa huomattavasti ympäristöön.
- Pitkäikäisyys: komponenttien on oltava mahdollisimman pitkäikäisiä sekä niiden on kestävä verkossa esiintyvät viat.

- Taloudellisuus: verkkoon investoidaan vain sen verran kuin se on tarpeellista ja häviökustannuksien on oltava mahdollisimman pieniä.

Näistä varsinkin luotettavuutta on pyritty korostamaan vuoden 2013 muuttuneessa sähkömarkkina-tilanteessa. Suuret myrskyt ja lumikuormat ovat aiheuttaneet laajoja ja pitkiä sähkökatkoja. Lakimuutoksella on haluttu vähentää altistumista luonnonvoimia kohtaan. Verkkoyhtiöt ovat alkaneet investoimaan kohti säävarmaa verkkoa, jotta pidemmiltä keskeytyksiltä vältyttäisiin. (YLE 2013.)

Sähkönsiirto ja -jakelu muodostuvat siirtojohtimien, muuntajien ja sähköasemien kokonaisuudesta. Verkossa on lisäksi sekundärilaitteita, joihin kuuluvat suojareleet, apujännitejärjestelmät, tiedonsiirto, tietojärjestelmät, käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmät. (Lakervi & Partanen 2009: 11.)

Sähköasemat luokitellaan yhdeksi tärkeimmäksi verkonosaksi, sillä ne ovat sähkönjake- lukeskuksia. Keskijänniteverkkoa syötetään usein 110/20 kV:n sähköaseman avulla. Kokonaisuus pitää yleensä sisällään 110 kV:n kytkinlaitoksen, päämuuntajat, 20 kV:n kytkinlaitoksen ja lisäksi apusähköjärjestelmän sekä automaattioratkaisut sisältäen suojareleistyksen. Sähköasemat ovat usein varmennettu useammasta 110 kV:n syöttösuunnasta. Niiden päämuuntajien koot vaihtelevat yleensä 10–40 MVA välillä. Sähköasemien tarkoitus on kytkentöjen suoritus siten, että hallitaan sähköenergian siirtoa eri johtojen välillä. Lisäksi jännitetasojen muutokset ja jännitteensäätö ovat sen erityisiä ominaisuuksia. (Lakervi & Partanen 2009: 119–121.)

Sähköasemilta syötetään sähköä keskijänniteverkkoon. Verkko on Suomessa rakennettu käytettäväksi säteittäisesti, mutta tietyissä kytkentätilanteissa silmukoidut yhteydet ovat mahdollisia. Keskijännitejohto on suojattu katkaisijan, ylivirta-, maasulku- ja jälleenkytkentäreleen avulla. Keskijänniteverkko on yleisesti aiemmin rakennettu periaatteella, että maaseudulle on rakennettu avojohdoilla ja kaupunkeihin maakaapelointina. Nykyään suunta on kuitenkin muuttunut suosimaan maakaapelointia. Usein keskijänniteverkko on varustettu erottimilla, jotka ovat käsikäyttöisiä tai kaukokäyttöisiä. Näiden avulla voidaan



esimerkiksi rajata vikapaikka koko johtolähdöltä tietylle johtopätkälle. (Lakervi & Partanen 2009: 125.)

Jakelumuuntajilla suoritetaan 20/0,4 kV jännitemuutos pienjänniteverkkoon. Yleisesti käytössä on pylväsmuuntamoita tai sitten puisto- tai kellarimuuntamoita. Pienjänniteverkon suojaus on toteutettu muuntamalla sulakesuojauksella. Sulake toimii vikavirta- ja ylikuormitussuojana. (Lakervi & Partanen 2009: 157.)

Pienjänniteverkko AMR-mittarin kautta on kuluttajien liittymäpiste sähkövoimajärjestelmään. Useimmat laitteet käyttävät pienjänniteverkossa olevaa jännitetasoa, joten ovat sellaisenaan suoraan liitettäviä laitteita verkkoon. Pienjänniteverkolla sähköenergia toimitetaan yleisesti kiinteistöjen pääkeskukseen, josta sähkönjakelu jatkuu kiinteistön sisäisillä asennuksilla.

## 2.2 Tehotasapaino

Sähköenergiaa ei ole kannattavaa varastoida suurissa määrissä. Sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen on oltava yhtä suurta eli tehon on oltava tasapainossa. Sähköverkon taajuudesta on havaittavissa tasapainotilanne. Pätötehon kulutuksen ollessa liian suurta, pienenee verkon taajuus. Kun tuotantoa on liikaa, niin silloin verkon taajuus kasvaa. Taajuutta pyritään pitämään tasaisena ja lähellä nimellisarvoaan taajuudensäädön avulla, jotta sähkövoimajärjestelmä toimisi optimaalisesti. Mikäli tehotasapainoa ei hallita, on seurauksena stabiiliuden menettäminen ja verkon romahtaminen. Taajuuden ylläpito vastaa siis tehotasapainon hallintaa. (Elovaara & Haarla 2011: 347; Fingrid 2018b.)

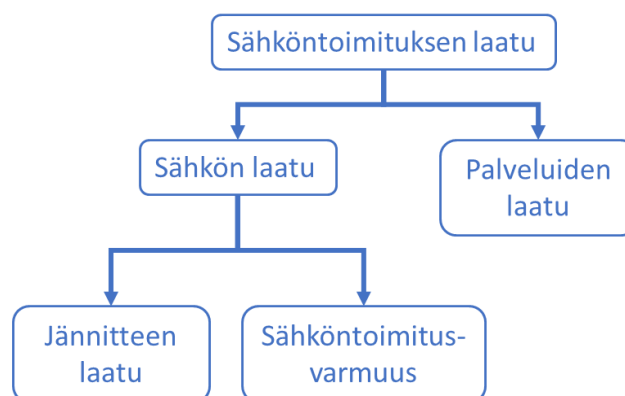
Energiamarkkinavirasto on määrittänyt Fingridin järjestelmävastuuseen. Vastuunhaltijan on vastattava, että sähköjärjestelmää ylläpidetään ja käytetään teknisesti oikein. Jännitteen ja taajuuden ylläpito kuuluvat edellä mainittuun vastuun piiriin. Fingrid joutuu tasapainottamaan tehopoikkeamia käyttötunnin aikana, johon käytetään avuksi reservejä. Sen vuoksi Fingrid vastaa taajuussäädön ja taajuusohjatun häiriöreservin hankinnasta sekä on kehittänyt säätösähkömarkkinapaikan. Häiriötilanteissa taajuudessa voi esiintyä

vaihteluja, jotka pitäisi pystyä mahdollisimman tehokkaasti tasoittamaan. (Elovaara & Haarla 2011: 60; Fingrid 2018b.)

Sähköverkossa pyörivän massan liike-energia pyrkii hidastamaan mahdollisia taajuusvaihteluja verkossa. Nykyaikainen verkko on kasvamassa suuntaan, jossa liike-energian eli inertian määrä on pienentymässä uusiutuvan energiamuodon lisääntyessä. On siis aletava miettimään keinoja taajuusvaihtelujen hallintaan. (Elovaara & Haarla 2011: 347–348; Järventausta, Pertti, Sami Repo, Petri Trygg, Antti Rautiainen, Antti Mutanen, Kimmo Lummi, ... & Martti Honkiniemi 2015.)

### 2.3 Sähkön laatu

Sähkönkuluttajan näkökulmasta sähkö on tuote, jonka on vastattava tiettyjä sille asetettuja laatuvaatimuksia. Sähkön laatuun määritellään, että asiakkaat saavat hyvälaatuisen jännitteen ilman keskeytyksiä sekä toimivan asiakaspalvelun. Laatu vaikuttaa myös sähkön hyödynnettävyyteen ja se jaetaan vielä erikseen kolmeen eri osa-alueeseen: Asiakaspalvelu, sähkön toimitusvarmuus ja jännitteen laatu. Kuvassa 4 on havainnollistettu laadun eri osa-alueet. (Elovaara & Haarla 2011: 419; Lakervi & Partanen 2009: 248.)



Kuva 4. Laadun osa-alueet (Elovaara & Haarla 2011: 420).

Ennen elektroniikan yleistymistä kulutuskojeet eivät huonontaneet sähkön laatua, koska ne käyttivät suoraan sinimuotoista virtaa. Nykyään elektronisten laitteiden yleistyttyä on

alettu kiinnittämään huomiota laadullisiin seikkoihin. Kyseiset laitteet eivät käytä enää puhdasta sinimuotoista virtaa, vaan aiheuttavat poikkeamia sinikäyrään. (Elovaara & Haarla 2011: 419.)

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan jännitteen laatua tarkemmin. Standardissa SFS-EN 50160 on määritelty jännitteen tasot, taajuudet, harmoniset ja epäharmoniset yliaallot, välkyntä sekä verkkokäskytaajuudet. Standardissa määritellään normaalin olosuhteen arvot kuluttajien liittymispisteissä. (Elovaara & Haarla 2011: 435.)

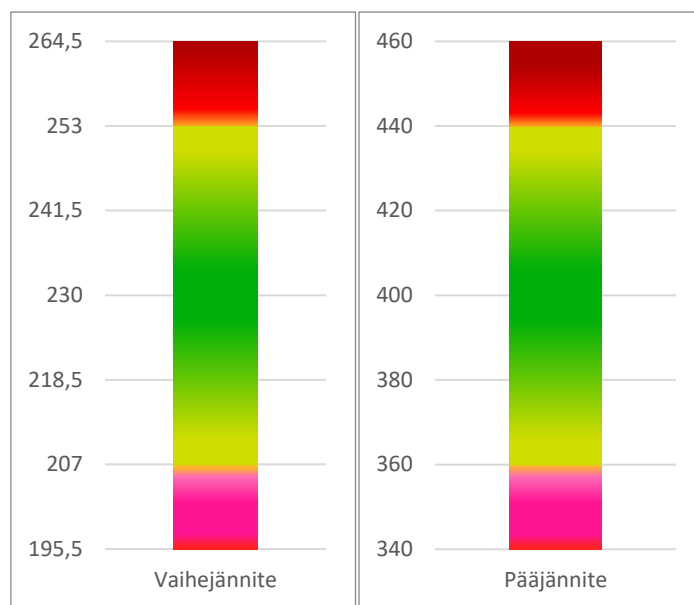
Sähkölaitteet rakennetaan hyödyntämään tiettyä jännitetasoa, lisäksi niiden on kestävä asetellut jännitevaihtelut. Todellisen käyttö- ja mitoitusjännitteen ollessa erisuuret, voivat laitteiden käyttöominaisuudet muuttua paljonkin. Kuluttajille näkyvät jännitteen laatu- vaihtelut muodostuvat lähinnä jakeluverkosta ja sen kuormitusten ominaisuuksista. Automaattisesti toimivat käänkytkimet pyrkivät tasaamaan siirto- ja alueverkossa tapahtuvat muutokset keskijännitekiskostoon mahdollisimman pieniksi. (Elovaara & Haarla 2011: 438; Lakervi & Partanen 2009: 18.)

Jännitteiden laatua tarkasteltaessa, jaetaan ominaisuudet kahteen osaan: jatkuviin ilmiöihin sekä jännitehäiriöihin. Jatkuvia ilmiöitä tapahtuu koko ajan verkossa, kuten esimerkiksi kuormien vaihteluista. Jännitehäiriöt ovat ennalta arvaamattomia tapahtumia, kuten mahdolliset viat verkossa. Standardissa on määritelty pienjänniteverkon nimellisjännitteeksi  $U_n = 230$  V vaiheen ja nollan väliltä nelijohtimisella kolmivaihejärjestelmälle. (SFS 50160 2010: 18.)

Jännitteessä tapahtuville erilaisille jatkuville vaihteluille on annettu termit: jännitetason vaihtelut, nopeat jännitemuutokset, epäsymmetria, yliaaltojännitteet sekä signaalijännitteet. Normaalitilanteen jännitetason vaihtelut täytyisi pysyä  $\pm 10$  % sisällä. Syrjäseuduilla jännitevaihtelut voivat olla suurempia,  $+10/-15$  % nimellisarvostaan (Lakervi & Partanen 2009: 251–255, SFS 50160 2010.) Kuvassa 5 on havainnollistettu jännitteiden vaihteluvälit, joissa niiden pitäisi pysyä. Seuraavassa katkelmassa standardista on tarkemmin määritelty jännitteen normaalilaatu.

95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla välillä  $U_n \pm 10$  %.

Kaikkien tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä  $U_n +10$  % /  $-15$  %. (Energiateollisuus 2014.)



Kuva 5. Vaihe- ja pääjännitteiden sallitut vaihtelurajat.

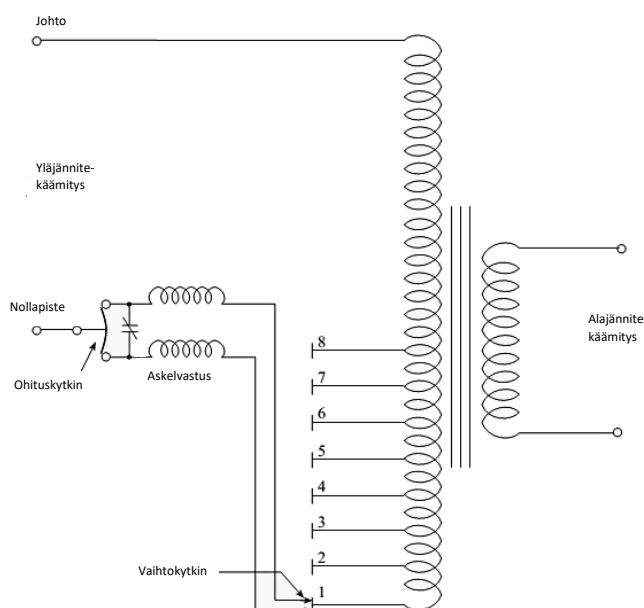
Jännitehäiriöiksi luokitellaan jännitekuopat, ylijännitteet sekä keskeytykset. Jännitekuopiksi luokitellaan jännitteet, jotka ovat alle 90 % nimellisestään. Kun taas 110 % nimellisjännitteestä olevat jännitteet ovat luokiteltu ylijännitteeksi. Käyttökeskeytys on tapahtunut silloin, kun liittymispisteessä on vähemmän kuin 5 % nimellisjännitteestä. (SFS 50160 2010.)

#### 2.4 Jännitteensäätö

Jännitteensäädön tarkoituksena on pitää jännite sovituisissa rajoissa eli huolehtia, ettei alitai ylijännitteitä esiinny verkossa ja pitää jännite mahdollisimman tasaisena. Lisäksi varmistaa käyttövarmuus sekä tukea sähkön laatua. Häviöiden minimointi eli toisin sanoen taloudellinen sähkönsiirto on myös tavoitteiden yksi osa-alue. Muuntajien käänkytimillä säädetään yleisesti jännitettä eri jännitetasojen välissä. Loisteho on myös yksi tekijä,

joka vaikuttaa jännitteen suuruuteen. Loistehoa tuottava laite nostaa jännitettä ja kuluttava laite laskee jännitettä. (Elovaara & Haarla 2011: 373–374.)

Muuntajien käämikytkimellä suoritetaan jännitteensäätöä 400/110 kV:n ja 110/20 kV:n tasojen välissä. Käämikytkimen tarkoituksena on pitää jännite kuluttajan liittymäpisteissä tasaisena. Käämikytkimet mahdollistavat  $\pm 15\%$  muuntosuhteen muutoksen kuormituksen aikanakin. Yleisimmin niissä on 9 porrasta, joten yhden portaan säätö vaikuttaa jännitteisiin 1,67 % verran, periaatteellinen toimintakaavio on esitetty kuvassa 6. Jakelumuuntajissa eli 20/0,4 kV tasomuutoksissa voidaan käyttää väliottokytkimiä, jotka mahdollistavat  $\pm 5\%$  muuntosuhteen muutoksen. Väliottokytkimiä voidaan säätää ainoastaan kuormittamattomasta muuntajasta. Tosin uusissa jakelumuuntajissa ei ole enää suosittu väliottokytkimiä Elenian verkossa. Jakeluverkkoon näkyvä jännitteensäätö toteutetaan 110/20 kV:n päämuuntajien käämikytkimien avulla, joiden tarkoitus on pitää alapuolen kiskoja jännite vakiona. Tällä pyritään vaikuttamaan kuormituksista johtuvien jännitevaihteluiden tasoittamiseen, jotta asiakkaiden kokema jakelujännite olisi mahdollisimman lähellä nimellistään. Perinteisesti sähköaseman keskijännitekiskon jälkeen ei jakeluverkoissa enää ole aktiivisesti jännitetason suuruuden hallintaan vaikuttavia laitteita. (Elovaara & Haarla 2011: 376–378; Hakola 1984: 26; Lakervi & Partanen 2009: 18.)



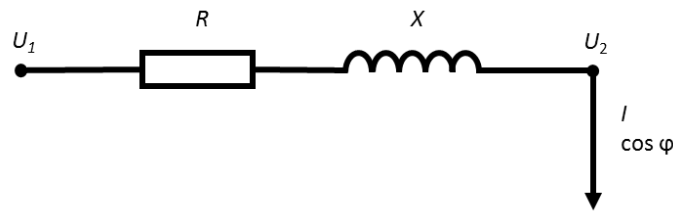
Kuva 6. Käämikytkimen toimintakaavio (EEP 2019).

Eleniassa sähköasemien kiskojännitteen käämikytkimen asettelu-/tavoitearvoksi on valittu 20,6 kV. Mahdollisissa korvaus tai erikoistilanteissa on käytetty jänniteensäädön tausta-asetteluja, joka on säätänyt kiskojännitteen 20,9 kV käämikytkimen ohjauksella. Käämikytkin pyrkii siis pitämään jännitteen asetellussa arvossa. Koska käämikytkimen portaat aiheuttavat yli 300 V hyppyjä kiskojännitteeseen, ei säätöä voida tehdä ihan tarkasti. Lisäksi ohjaukseen on määritelty aikaviive, jotta nopeat jännitemuutokset eivät aiheuttaisi käämikytkimen toimimista jatkuvasti.

Jännitteenalenema on otettava huomioon jänniteensäädössä, sillä keskijännitejohto, jakelumuuntaja ja pienjännitejohto aiheuttavat jännitteenalenemistä kiskojännitteen ja kuluttajan liittymäpisteen välillä. Kuvassa 7 on esitetty sijaiskytkentä yksivaiheiselle kuormitetulle johdolle. Jännitteenalenema voidaan laskea yhtälöllä

$$\begin{aligned}
 U_d &= |U_1| - |U_2| \\
 &\approx IR\cos\varphi + IX\cos\varphi \\
 &= I_p R + I_q X,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

missä  $I_p$  ja  $I_q$  ovat kuormitusvirran pätö- ja loiskikomponentteja,  $R$  on johdon resistanssi ja  $X$  on johdon reaktanssi. Kaavan perusteella huomataan, että kuormitusvirta, johdon ominaisuudet sekä tehokerroin ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat aleneman suuruuteen. Suunniteltaessa verkkoa on otettava tarkasteluun johdon loppupään jännite maksimikuormitustilanteessa. Kuormituksen ollessa pienempää, myöskin jännitteenalenema on vähäisempää. Johtoja mitoittaessa on otettava huomioon mahdollinen maksimikuormitustilanne ja kuormitusten muuttuminen tulevaisuudessa, jottei jännitteenalenema pääse nousemaan liian suureksi mahdollisen kuormitusvirran kasvaessa. (Lakervi & Partanen 2009: 38.)



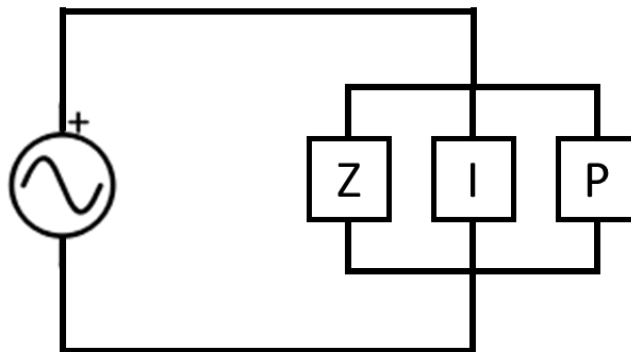
Kuva 7. Kuormitetun johdon yksivaiheinen sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen 2009).

## 2.5 Kuormien jänniteriippuvuus

Ohmin lain perusteella voidaan todeta, että vakioimpedanssisen kuorman teho pienenee jännitettä vähentäessä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi lämminvesivaraajat, uunit ja hehkulamput. Huomiona kuitenkin, että kyseiset laitteet ovat usein lämpötilaohjattuja. Pienempi teho pidentää niiden toiminta-aikaa, jolloin energiankulutus jakautuu pidemmälle aikavälille. Vakioteholla toimivat laitteet taas vaativat lisää virtaa, kun niiden käyttöjännitettä pienennetään. Virran kasvaminen johtimilla aiheuttaa taas suurempia siirtohäviöitä. Kyseisenlaisia laitteita ovat tietokoneet ja televisiot. Kuormitustyyppit voidaan jakaa neljään eri kategoriaan (Ellens, Berry & West 2012):

- Vakioimpedanssiset kuormat ilman takaisinkytkentää. Näiden laitteiden energiankulutus pienenee jännitteen alentamisen myötä.
- Vakioenergiaiset kuormat eli vakioimpedanssisen kuormat takaisinkytkennällä. Pitävät energiankulutuksen vakiona, mutta pienentävät hetkellistehoja jännitettä alennettaessa.
- Vakiotehoiset kuormat, joiden vuoksi kokonaisenergiankulutus kasvaa, johtuen kasvavista kuormitushäviöistä jännitettä alennettaessa.
- Vakiovirtaiset kuormat, joiden energiankulutus pienenee jännitettä alennettaessa.

Verkossa on erilaisia kuormia, joista jokainen reagoi eri tavalla muuttuneeseen jännitteeseen. Mallinnettaessa verkon käyttäytymistä jännitteiden muutoksessa, joudutaan muodostamaan mallinnuksia laskentaohjelmiin. Tarkemmat mallit vaativat kuormitusmallien luomista, joita varten on kehitetty niin sanottu ZIP-malli. Mallissa  $Z$  kuvaa vakio impedanssista kuormaa,  $I$  kuvaa vakiovirtaista kuormaa ja  $P$  kuvaa vakiotehoista kuormaa. ZIP-mallia on nykyään haluttu vielä kehittää siten, että siihen on lisätty tekijä  $E$ , kuvaaan vakioenergistä kuormaa. Kuvassa 8 on havainnollistettu ZIP-mallin toimintaa simuloinneissa. Koska jokainen tekijä käyttäytyy eri tavoin jännitteiden muuttuessa, vaikeuttaa tämä jännitteensäädön vaikutuksien arviointia. (Sen & Lee 2014.)



Kuva 8. ZIP-malli havainnollistettuna.

Taulukossa 1 on eritelty kulutustyyppikategoriat. Siinä on esitetty perusyhtälöt sekä tehon kaavat, joiden perusteella on määritelty eri kuormituksen jänniteriippuvuus.



Taulukko 1. ZIP-mallin käyttäytyminen (Sen &amp; Lee 2014).

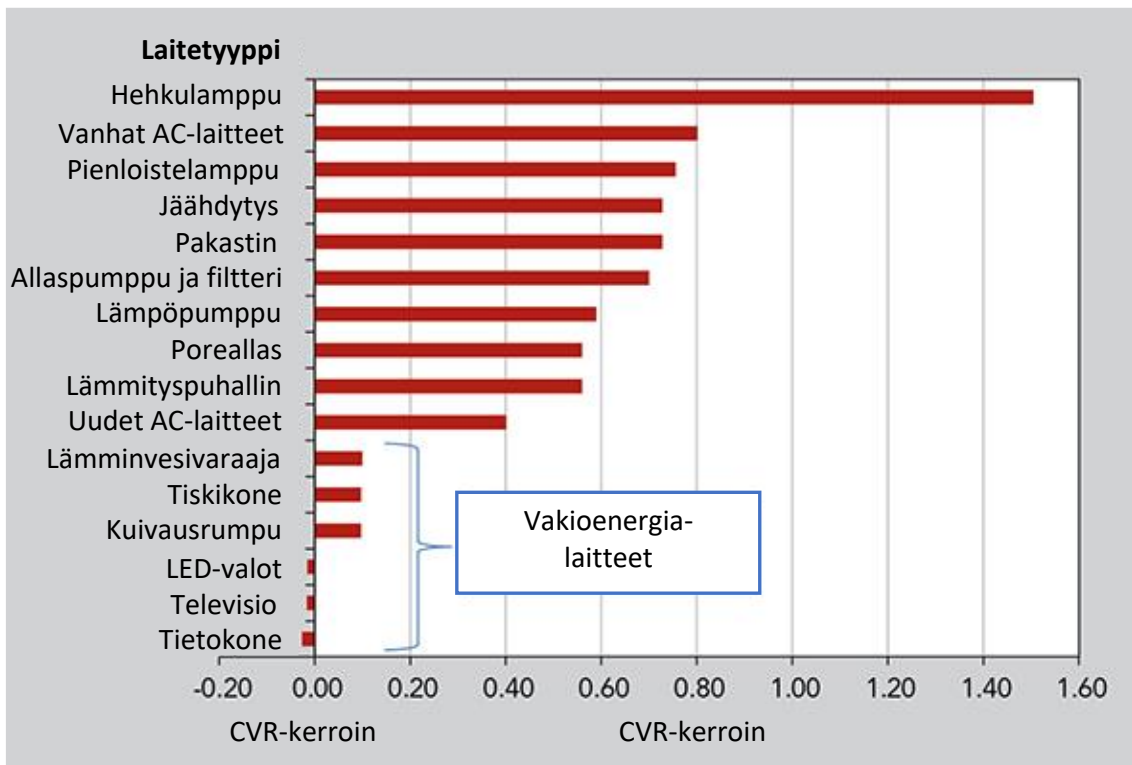
Tyyppi	Perusyhtälöt	Päto- ja loisteho	Jänniteriippuvuus
Vakioimpedanssi $\bar{Z} = R \pm jX$	$\bar{U} = \bar{I}\bar{Z}$ $\bar{S} = \bar{U}\bar{I} = P \pm jQ = \bar{U}^2/\bar{Z}$	$P = I^2 R$ $\pm Q = I^2 X$	$P \propto U^2$ $Q \propto U^2$
Vakiovirta $\bar{I}$	$\bar{S} = \bar{U}\bar{I} = P \pm jQ$	$P = UI \cos \theta$ $\pm Q = UI \sin \theta$	$P \propto U^1$ $Q \propto U^1$
Vakioteho $\bar{S}$	$\bar{S} = \bar{U}\bar{I} = P \pm jQ$	$P = UI \cos \theta$ $\pm Q = UI \sin \theta$	$P \propto U^0$ $Q \propto U^0$
Vakioenergia $E$	$U = IR$ $E = P\Delta t$	$P = I^2 R = U^2/R$	1

Jännitteen alentumisesta saatavia vaikutuksia ei ole helppo arvioida kompleksisen kuormituksen vuoksi. On kuitenkin kehitetty kaava

$$CVR_f = \frac{\% \text{ Vähentynyt teho}}{\% \text{ Jännitteen alentaminen}}, \quad (2)$$

missä määritellään CVR-kerroin, jolla mitataan jännitteen alentamisesta saatuja hyötyjä niin energian säättämisessä kuin kulutuspiikkien siirtämisessä. CVR tehokkuutta arvioidaan pätoehon, loistehon ja energian kannoilta. Kaavassa 2 on esitetty kertoimen muodostuminen, jossa pienentynyt teho prosenteissa on jaettu pienennetyllä jännitteellä prosenteina. (Sen & Lee 2014.)

Erilaiset tutkimukset ovat selvittäneet kodin sekä kaupallisten laitteiden CVR-kertoimia. Mitä suurempi kerroin on, sitä enemmän kuorman teho reagoi jännitteenmuutoksen suuntaan. Useimmissa laitteissa kerroin on vähintään 0,50, jolloin jännitteen pienentyessä käytettävä teho pienenee. Poikkeuksen muodostavat tehoelektroniikkaan perustuvat laitteet, jotka toimivat vakioteholla. Kuvassa 9 on esitetty erilaisten laitteiden käyttäytymistä pienemmällä jännitteellä. (Ardis & Uluski 2015.)



Kuva 9. Eri laitteiden CVR-kertoimia (Ardis & Uluski 2015).

Tutkimuksissa on lisäksi osoitettu, että useimmat sähkölaitteet kuluttavat vähemmän sähköä jännitteen alentamisen vuoksi ilman, että se aiheuttaisi niille merkittävää suorituskyvyn heikentymistä, haitallista toimintaa tai negatiivista vaikutusta. Laitteet voivat jopa toimia tehokkaammin pienemmällä jännitteellä, jolloin niiden käyttämä teho on pienempi. Kun laitteet käyttävät vähemmän tehoa, voi jopa kokonaisenergiankulutus pienentyä. (Ardis & Uluski 2015.)

## 2.6 Loisteho

Sähköverkon ensisijainen tarkoitus on siirtää pätötehoa tuotantolaitoksilta kuluttajille, sillä pätöteholla suoritetaan itse työ. Vaihekulma kertoo jännitteen ja virran välisen kulmaeron. Vaihe-eron ollessa positiivinen, on jännite virtaa edellä ja siirretty loisteho on induktiivista loistehoa. Vaihe-eron ollessa negatiivinen, on jännite virtaa nähden jäljessä ja siirretty loisteho kapasitiivista. Kapasitiivisen loistehon ottaminen verkosta tarkoittaa loistehon kulutusta, toisin sanottuna verkkoon luovutetaan induktiivista loistehoa. Kun

taas kapasitiivista loistehoa luovutetaan verkkoon, niin silloin tarkoitetaan, että verkkoon tuotetaan loistehoa.

Siirtojohdot tuottavat verkkoon loistehoa. Johtojen ja kaapeleiden erilaiset ominaisuudet vaikuttavat yhtenä tekijänä tuotettavan loistehon määrään. Yleisesti ottaen kaapeliverkko tuottaa enemmän loistehoa kuin vastaava ilmajohdoverkko. Loistehotaseen määräytyminen johdolla on esitetty yhtälössä

$$Q_j = \frac{U_1^2}{X} + \frac{U_2^2}{X} - 2 \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta - \frac{B U_1^2}{2} - \frac{B U_2^2}{2}, \quad (3)$$

jossa  $U_1$  johdon alkupään jännite,  $U_2$  johdon loppupään jännite,  $X$  reaktanssina ja  $B$  susceptanssina ovat muun muassa johtokohtaisista arvoista muodostuvia tekijöitä. Loistehotase kuvaa johdon verkosta ottamaa loistehoa. Loistehotase on muodostunut johdon reaktanssin kuluttaman ja kapasitanssin tuottaman loistehojen erotuksesta. Jos tase on positiivinen, niin johto kokonaisuudessaan kuluttaa loistehoa ja jos negatiivinen, niin johto kokonaisuudessaan tuottaa loistehoa. Kaavasta 3 havaitaan, että johdon loistehon kulutukseen tai tuotantoon vaikuttaa suuresti johdon jännitteet. Koska kaikki jännitetekijät ovat osoittajissa, vaikuttaa jännitteen muuttaminen suoraan loistehon määrään. Eli jos jännitettä pienennetään, pienenee myös loistehotase. (Elovaara & Haarla 2011: 365–366)

### *Loistehoikkuna*

Vuoden 2016 muutoksen jälkeen loistehon siirto jakeluverkon ja kantaverkon välillä on alkanut kiinnostamaan verkkoyhtiöitä enemmän, sillä loissähkön toimitusta koskevaa määrittelyä muutettiin kantaverkkoyhtiön toimesta. Vuoden 2017 alussa otettiin käyttöön loissähkön uusi hinnoittelumalli. Malli oli rakennettu 2 vuoden siirtymällä ja vuodesta 2019 lähtien peritään täydet loistehomaksut. (Fingrid 2018b.)

Kuvan 10 mukaisesti on määritelty kantaverkon liittymäpisteestä ilman loistehomaksua annetun ja otetun loissähkön määrä. Loissähköikkunan ylitykset huomioidaan maksuilla. Loistehomaksuksi on määritelty 1000 €/MVA<sub>r</sub>, kk ja loisenergiamaksuksi 5 €/MVA<sub>r</sub>h rajojen ylitettyä. Kuitenkaan rajat eivät ole käytännössä ihan tiukkoja, sillä 50 suurinta



## 2.7 Sähkömarkkinat

Kysynnän ja tarjonnan perusteella määräytyy sähkön tukkuhinta joka tunnille. Nord Pool Spot hallitsee pohjoismaisia sähkömarkkinoita. Tarjouksia antavat niin sähköntuottajat, sähkönmyyntiyhtiöt kuin teollisuusyritykset. Nord Pool Spot sisältää kaksi erilaista markkinapaikkaa Elbas ja Elspot. Elspot-markkina on vuorokausimarkkina, jolla määritellään sähkön hinta seuraavalle vuorokaudelle tuntitasolla. Elbas on päivänsisäinen markkinapaikka, jossa on mahdollistettu päivän sisällä tehtävät sähkökaupat. (Elovaara & Haarla 2011: 48–49; Järventausta ym. 2015.)

Sähkökaupat on sovittu etukäteen, mutta jälkikäteen tarkistetaan kauppojen toteutuminen. Taseselvityksessä selvitetään jälkikäteen toteutuneet sähkökaupat sekä määritellään tasepoikkeama. Eli jos osapuolet kuluttavat tai tuottavat sovitusta määrästä enemmän tai vähemmän, niin joutuvat he siitä korvausvastuuseen. (Elovaara & Haarla 2011: 390–391, 395.)

Sähkön toimitusvarmuus turvataan reservijärjestelmällä. Tätä järjestelmää tarvitaan silloin, kun markkinaehtoisella sähköllä ei saada katettua kulutusta. Taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit ovat automaattisesti taajuuden perusteella toimivia reservejä. Näiden tehtävänä on pyrkiä pitämään taajuus normaalilla taajuusalueella 49,9–50,1 Hz välissä eli tukea normaalitilan tehosäätöä. Fingrid hankkii reservit tarjousperusteisilta vuosi- ja tuntimarkkinoilta. (Elovaara & Haarla 2011: 356; Fingrid 2018b; Järventausta ym. 2015.)

Reservit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: Taajuusohjattu käyttöreservi, taajuusohjattu häiriöreservi ja automaattinen taajuudenhallintareservi. Taulukossa 2 on eritelty tarkemmin kyseisten reservien minimitarjouskoko sekä aktivoitumisehdot. Käyttöreservin tehtävä on pitää taajuus normaalilla alueella 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Häiriöreservi pyrkii taas pitämään taajuuden 49,5 Hz yläpuolella. Automaattisen taajuudenhallintareservin tarkoituksena on palauttaa taajuus nimellisarvoonsa. (Elovaara & Haarla 2011: 356; Fingrid 2018b; Järventausta ym. 2015.)

Sähkönkuluttajat ja -tuottajat voivat osallistua säätösähkömarkkinoille antamalla säätötarjouksia. Säätösähkömarkkinasopimuksen avulla he voivat tarjota säätökykyistä kapasiteettia markkinoille. Markkinoille voidaan hyväksyä sellaiset resurssit, joilla voidaan toteuttaa tietyn suuruinen tehonmuutos 15 minuutin sisällä. Säädön aktivoiminen tapahtuu manuaalisesti ja sen suunta voi olla ylös- tai alassäätöä. Suomessa säätövoima on toteutettu suurimmaksi osaksi vesivoiman avulla. Tehoreservin avulla turvataan sähkön toimitusvarmuus. Sitä käytetään silloin kun suunniteltu sähköenergian hankinta ei vastaa ennakoitua kulutusta. (Elovaara & Haarla 2011: 60, 393–394; Fingrid 2018b.)

Tuotantoresursseille on määritelty erilaisia markkinapaikkoja, joissa he voivat toimia. Yhtä lailla samoja markkinatuotteita voidaan käyttää myös kysyntäjoustossa. Kysyntäjoustoa voidaan hyödyntää niin ikään säätösähkömarkkinoilla kuin reservimarkkinoilla. (Fingrid 2018b.)

Sähkömarkkinalaissa on määritelty sähköverkkotoiminnan eriyttäminen: ”Sähkömarkkinoilla toimivan yrityksen on eriytettävä sähköverkkotoiminta muista sähköliiketoiminnoista sekä sähköliiketoiminnot muista yrityksen harjoittamista liiketoiminnoista.” (Sähkömarkkinalaki 2013.) Muiksi sähköverkkoliiketoiminnan osiksi on määritelty sähkönmyynti- sekä sähköntuotantotoiminnot (Energiavirasto 2015). Joten verkkoyhtiö ei voi myydä kysyntäjoustopotentiaalia itsenäisesti markkinoille. Kyseistä problematiikkaa varten olisi tutkittava keinoja, joilla sähköverkkoyhtiöt voisivat hyödyntää jännitteensäädöllä saavutettavia kysyntäjoustopotentiaaleja myös muille toimijoille sekä myydä potentiaalia sähkömarkkinoille. Käytännössä väliin tarvittaisiin tällä hetkellä myyjä tai aggregaattori välikädeksi. Aggregaattorista kerrotaan lisää luvussa 3. Mahdollisella sähkömarkkinalakimuutoksellakin voitaisiin edistää kysyntäjoustopotentiaalin toteuttamista verkkoyhtiöiden kanalta.

Kysyntäjoustopotentiaalin myymisessä on muitakin rajoitteita. Sähkömarkkinoilla on vaatimuksia säädölle kuten esimerkiksi tarjouskoko sekä aktivoitumisaika. Tarjouskoko varten pitäisi pystyä määrittämään tarjottava potentiaalimäärä. Esimerkiksi kysyntäjoustopotentiaalia tarjotessa kapasiteetin määrittely on haastavaa sen todentamisen vuoksi. Kaikkea kapasiteettia ei voida tarjota yhdellä hetkellä. Jos ohjaus epäonnistuisi, voitaisiin

aktivoida tarjouksen ulkopuolinen kapasiteetti toteuttamaan luvattu säätömuutos. Toteutumattomasta säädöstä joudutaan maksamaan sakkomaksu järjestelmävastaavalle. (Koski 2019.)

Taulukko 2. Kysyntäjoustop erilaiset markkinapaikat (Fingrid 2018b).

Tuote	Sopimustyyppi	Minimitarjouskoko	Aktivoituminen	Aktivoituu
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosi- ja tunti-markkinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1-49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Useita kertoja tunnissa
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosi- ja tunti-markkinat	1 MW	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9-49,5 Hz kun f alle 49,5 Hz 50% 5s ja 100% 30s	Muutaman kerran vuodessa
			Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s tai 49,6 Hz 3s tai 49,5 Hz 1s	Muutaman kerran vuodessa
Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	Tunti-markkinat	5 MW	FG:n lähettämän tehopyyntisignaalin mukaisesti, 100% 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa
Säätösähkömarkkinat (mFRR)	Tunti-markkinat	5 MW	100% 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	Viikko-markkinat	5 MW	100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Vuorokausimarkkina (Elspot)	Tunti-markkinat	0,1 MW	12 h	-
Päivän sisäinen markkina (Elbas)	Tunti-markkinat	0,1 MW	1 h	-
Tehoreservi	Pitkäaikainen	10 MW	15 min kuormille, 12 h voimalaitoksille	Harvoin

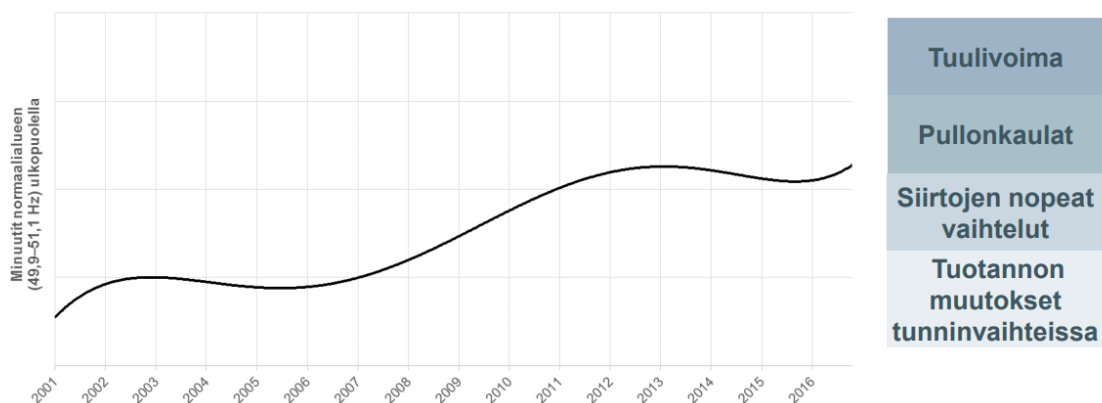
### 3 KYSYNTÄJOUSTO

Sähkön tuotantorakenne on muuttumassa suuntaan, jota on teknisesti hankalampi ohjata kysynnän tarpeiden perusteella. Tämän vuoksi tarvitaan yhteistyötä energiamarkkinoille osallistuvien tahojen välille. (Palola 2016.) Tässä luvussa avataan kysyntäjoustop tarpeiden esille tuloa sekä käydään tarkemmin läpi kysyntäjoustop nykyisin sekä sen suuntausta ja kehitystä.

Ilmastonmuutoksen torjumisessa päästöjen pienentäminen on merkittävässä roolissa. Sähköntuotantomuotoihin ja energiatehokkuuteen on alettu kiinnittämään entistä enemmän huomiota ilmastonmuutoksen vuoksi. Fossiilisen sähköntuotannon osuus markkinoilla pienenee ja uusiutuvien aurinko- ja tuulivoiman määrä kasvaa. Fossiiliset tuotantotavat ovat mahdollistaneet aiemmin tuotannon nopeat säädöt eli ns. tehonsäätöpalvelut koko sähköjärjestelmälle. Ydinvoima tuottaa tasaisella teholla sähköä ja uusiutuva energia on riippuvainen ulkoisista tekijöistä. Sähköntuotannon ja -kulutuksen välinen tehota-sapainon hallinta on entistä vaativampaa. Energiamurrokseen etsitään kipeästi uusia ratkaisuja. Jos kysyntää saataisiin siirrettyä pois huipputunneilta, saataisiin sähkönmarkkinahintaa pienemmäksi sekä tuotettua sähköenergiaa vähäpäästöisemmin (Bremer, Frilander, Kaskinen & Malho 2017; Järventausta ym. 2015; Pahkala, Uimonen & Väre 2018.)

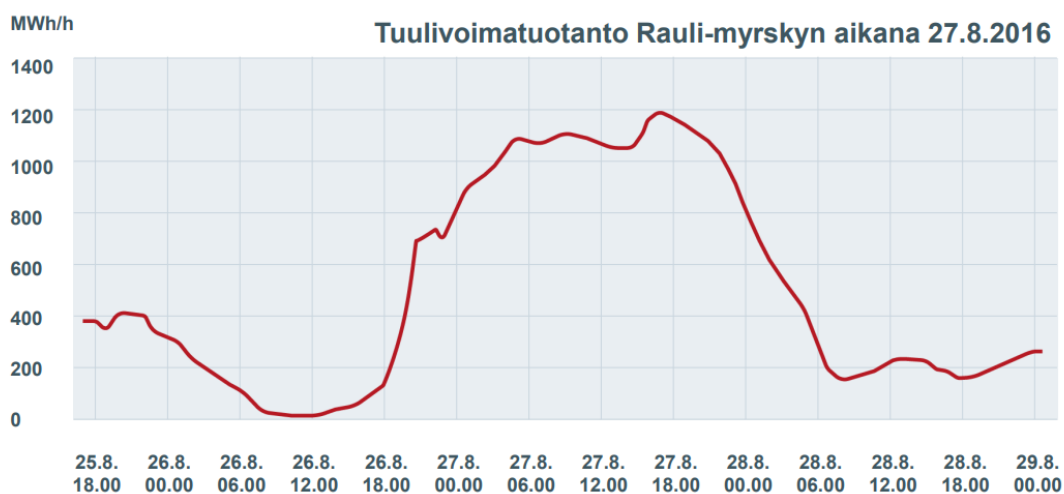
Kuvasta 11 nähdään, että sähköjärjestelmän tasapainottamisen suunta heikentynyt lähes koko 2000 luvun aikana. Kuvassa on esitetty minuutit, jotka ovat olleet 49,9–51,1 Hz taajuusalueen ulkopuolella. Fingrid on listannut 4 merkittävää syytä, jotka vaikuttavat tasapainottamiseen: tuulivoiman lisääntyminen, siirtoverkon pullonkaulat, siirroissa tapahtuvat nopeat vaihtelut sekä tuotannon muutokset tunnin vaihtuessa.





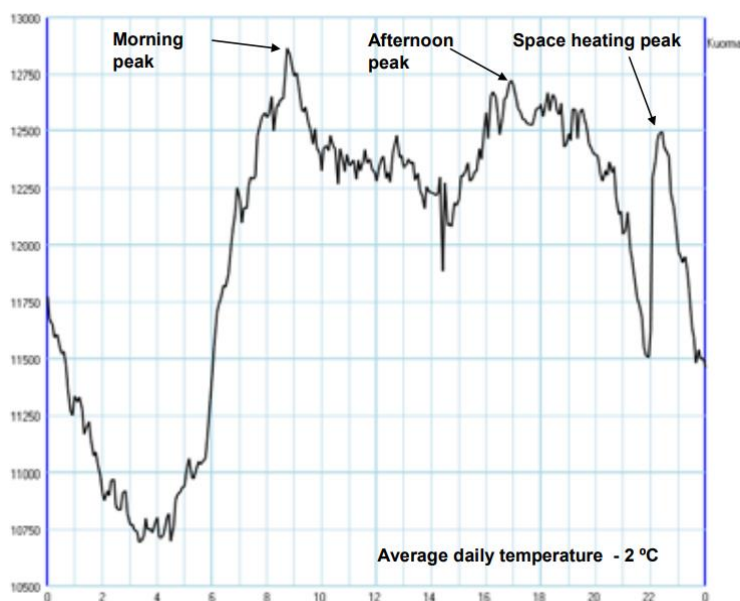
Kuva 11. Sähköjärjestelmän toiminta normaalin taajuusalueen ulkopuolella (Fingrid 2016).

Kuvasta 12 voidaan havaita, millaisia tehovaihteluita tuulivoimasta voi aiheutua muutamien päivien sisälle. Tuulivoiman määrän kasvaessa tehon vaihtelut tulevat kasvamaan, mikä puolestaan lisää tarvetta kysynnän joustamiselle.



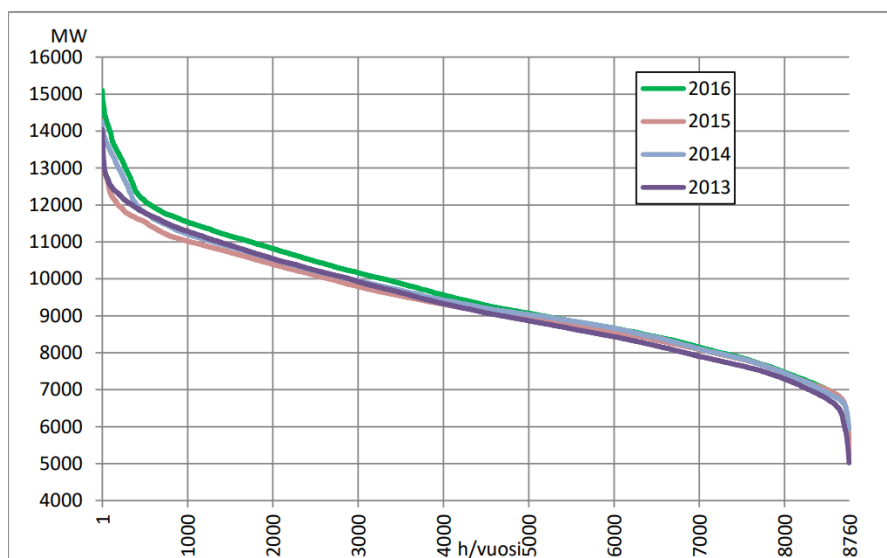
Kuva 12. Tuulivoimatuotannon vaihtelut erään myrskyn aikana (Fingrid 2016).

Kuvan 13 perusteella voidaan havaita sähkönkulutuksen riippuvuus tunneittain Suomessa. Kuva edustaa tavallista talvipäivää, jossa on havaittavissa kolme erilaista huippua: aamupiikki, iltapäiväpiikki ja yöpiikki. Kyseisten piikkien aikana kulutus selvästi kasvaa hetkellisesti. Optimaalinen tilanne olisi tasoittaa kulutuspiikit pois.



Kuva 13. Sähkön käytön jakautuminen jokaiselle tunnille (Segerstam ym. 2007).

Kysyntäjoustop tarkoituks on tasoittaa kysynnän ja tuotannon välinen erotus siten, että kenellekään ei aiheutuisi haittaa. Suuria hetkellisiä tehontarpeita olisi tarkoitus siirtää myöhempään ajankohtaan, jolloin markkinoilla olisi ylitarjontaa sähköenergiasta. Tällä tavoin sähkökulutuksen pysyvyyskäyrä, joka on esitetty kuvassa 14, saadaan käännettyä vaakasuuntaisemmaksi. Käyrästä havaitaan, että suurin tehontarve on jakautunut muutamalle sadalle tunnille vuodessa. Kysyntäjousto vaikuttaa myös tarvittavaan huipputuotantokapasiteetin määrään, jolloin ei ole enää tarvetta pitää niin paljon tuotantokapasiteettia reservissä. Kysyntäjousto myös tasapainottaa sähkömarkkinoiden toimintaa. (Farin, Kärkkäinen, Pihala 2005; Segerstam, Juntila, Lehtinen, Lindroos, Heinimäki, Hänninen & Salomaa 2007.)



Kuva 14. Sähkönkulutuksen pysyvyyskäyrä (Energiavirasto 2017).

Eri toimijat saavat erilaiset hyödyt ja vaikutukset kysyntäjoustop käytämisestä. Kanta-verkkoyhtiö hyötyy kysyntäjoustop mahdollisuutena käyttää säädettävää potentiaalia tehotaapainon ylläpitoon sekä taajuuden säätöön. Kapasiteettia voidaan myydä säätösähkö- sekä reservimarkkinoille. Jakeluverkkoyhtiö voisi hyödyntää joustopa verkop suunnittelun pohjana sekä käyttötoiminnan apuna, kuten huipputehon hallinnassa. Sähkön myyjä hyötyisi sähkön hankinnan suunnittelussa, tasehallinnassa, säätösähkön tarjouksissa sekä tuotteistamisessa. Sähkön kuluttaja eli asiakas hyötyisi sähkönkulutuksen siirtämisestä halvemmalle ajan hetkelle sekä mahdollisesti huipputehojen pienenemistä, jos tehopohjainen tariffimaksu tulisi käyttöön. Tehopohjaisessa tariffissa on ideana, että käytetyillä huipputehojen suuruuksilla olisi vaikutusta siirtomaksujen suuruuteen. (Järventausta ym. 2015.)

### 3.1 Perinteinen kysyntäjoustop

Kysyntäjoustop on ollut enemmän teollisuuden hyödyntämä ominaisuus, mutta nykyään halutaan myös muitakin kuluttajia mukaan. Kysyntäjoustop ei haluta näyttäytyvän vaatimuksena vaan palvelun lisäämisenä, jolloin kuluttajat saisivat paremmin vaikutettua sähkönkulutukseensa. Kysyntäjoustop halutaan olevan teknologinen kokonaisuus, jonka avulla saataisiin kuluttajia mukaan. Kokonaisuudella tarkoitetaan, että pystyttäisiin

ohjamaan erilaisten lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden kulutusta sekä vaikuttamaan sähköauton lataukseen. Tarkoituksena olisi optimoida kuluttajan sähkönkulutusta, kuten lämmitystä kodin ollessa tyhjä tai lämminvesivaraajan lämmitystä halvemman markkinahinnan aikaan. Mahdollisen kotiautomaation kautta voitaisiin ohjata muitakin kodin sähkölaitteita. (Bremer ym. 2017.)

Kysynnänjouston liittyy haasteita taloudellisista sekä poliittisista tekijöistä. Sen pitäisi olla taloudellista kaikkien osallistujien kannalta, tekniikan pitäisi olla helppokäyttöistä ja hinnoittelun selkeää. Säädöksiä ei ole vielä ajateltu kysyntäjouston kannalta. Nykyään on pääasiassa puhuttu vain vuosienergian säästämisestä, eikä tehon suuruudesta tai energian ajallisesta jakautumisesta. Joustavat kohteet täytyy ottaa huomioon, sillä ne eroavat toisistaan käyttötavoiltaan, toiminta-ajoiltaan, säädettävyydeltään, jouston pituudeltaan sekä jälkivaikutuksiltaan. Huomiona on nostettava, että joustoa voi tapahtua vain, jos kulutusta on alun perin verkossa käytössä. Lisäksi ohjauksen toteuttamistapa sekä käyttäjien kokeamat haitat pitäisi ottaa huomioon pohdittaessa toteutusta. (Järventausta ym. 2015; Kiviluoma & Helistö 2014.)

### 3.1.1 Joustokohteet

Perinteinen kysyntäjousto on suunniteltu ns. kuormanohjaustyypillisesti, jolloin asiakkaiden kuormia ohjattaisiin päälle tai pois. Asuinkiinteistöjen sähkönkulutuksessa tapahtuu paljon vaihtelua tunneittain sekä vuodenajoittain. Kiinteistöjen joustopotentiali ei ole kaikkien laitteiden yhteisteho, koska harvemmin kaikkia laitteita käytetään yhtä aikaa. Esimerkiksi ruuanlaitto, kodinkoneet, kodinelektroniikka ja valaistus ovat ennustamattomia kuormia. Niihin ei ole tekniseltä eikä käyttömukavuuden säilyttämisen kannalta kuormanohjausratkaisua. (Järventausta ym. 2015.)

Suuri kuormanohjausmahdollisuus muodostuisi omakotitalojen sähkölämmityksestä sekä lämminvesivaraajista. Tosin sähkölämmityksen poiskytkeminen onnistuisi ainoastaan lämmityskausien aikana. Toisaalta yksittäisiä asiakkaita ei voida kovin pitkiä aikoja pitää ilman lämmitystä, jolloin ohjausta jouduttaisiin toteuttamaan ryhmissä. (Järventausta ym. 2015; Kiviluoma & Helistö 2014.)

Kuormanohjausperusteisen kysyntäjouaston hyödyntäminen vaatisi muutoksia. Sähköjärjestelmien suunnitteluun tulisi vaatimuksia, sekä tavoitteita kysyntäjouastoon osallistumisesta (Järventausta ym. 2015):

- AMR-mittareita pitäisi hyödyntää tehokkaammin, kuten ohjausliittimet sine-töidyn osan ulkopuolella, jotta kolmannellakin osapuolella olisi mahdollisuus hyödyntää kuormanohjaustietoa.
- Suuritehoisilta laitteilta pitäisi vaatia keskuksille ohjausmahdollisuutta.
- Kuormitusten ryhmittelyyn pitäisi löytää yhteisiä ratkaisuja.
- Ohjauskomentojen rajapinnat pitäisi olla erilaisten järjestelmien välissä.
- Laitteiden suojaustoiminnot pitäisi säilyttää, kuten esimerkiksi käyttökatkon aikana laite ei jäätyisi.

### 3.1.2 Kulutuksen jakautuminen

Perinteisen kuormanohjauksen potentiaalia tulevaisuuden kysyntäjouastossa on pyritty määrittämään useissa tutkimuksissa. Kulutustehot tiedetään energiankulutustietojen perusteella, mutta tarkkaa kuormanohjauksen määrää ei usein tiedetä ilman mittausta. Esimerkiksi kuormanohjausrele voidaan kytkeä ohjaamaan lämminvesivaraajaa, jonka hetkittäinen lämmitysteho voi olla 3 kW. Kuormanohjauksella ei tosin ole vaikutusta, jos veden lämmitys ei ole päällä. (Järventausta ym. 2015.) Käytännössä jouaston tarjoaminen sähkömarkkinoille vaatii paljon ohjattavia kuormituksia, ettei yksittäisen kuluttajan muutokset tehoissa vaikuttaisi kokonaispotentiaalimäärään. (Koski 2019.)

Ajatellen esimerkiksi lämmityskuormaa kysyntäjouastossa, tarvittaisiin tieto, paljonko kuormaa on ohjattavissa. Tähän voidaan esimerkiksi lämmityksen osalta olettaa kuorman riippuvan lineaarisesti ulkolämpötilasta. Sähkökulutuksen riippuvuudesta ulkolämpötilaan voidaan muodostaa kerroin, jonka avulla voidaan sitten mallintaa kuormitusta eri lämpötiloissa. (Järventausta ym. 2015.)

Kuvassa 15 on havainnollistettu rakennusten sähkötehon tarve, kun ulkolämpötila on nollassa asteessa. Kyseinen lämpötila on keskimääräinen ulkolämpötila lämmityskaudella Suomessa. Yhden asteen pakastuminen aiheuttaa viikkokeskitehoon kasvua noin 100 MW:lla. Kovimpien pakkasjaksojen aikana taulukon lämmitystehotarve voikin olla jopa kaksinkertainen. Sähkölämmityksen havaitaan kuluttavan eniten energiaa. Lisäksi pakkasilla tulee mukaan myös sähköllä toimivia lisälämmittäjiä, jotka nostavat sähkötehon tarvetta noin 30–50 MW astetta kohden. (Järventausta ym. 2015.)

Rakennuskannan keskimääräisen sähkötehon tarvearvio 0 °C ulkolämpötilalla (keskimääräinen ulkolämpötila lämmityskaudella). Lähde: TEHOREM -mallin kehitysversio	tilojen sähkölämmitys	lämminkäyttövesi	toiminta-sähkö	valaistus-sähkö	talo-tekniikka	yhteensä	Tarkempi tarkastelukohte: Ilmanvaihtokoneet päivä-aikaan
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
Omakotitalot	1379	193	609	118	137	2436	49
Rivitalot	207	28	131	26	28	420	12
Asuin kerrostalot	30	4	333	71	108	546	41
Yksityiset palvelurakennukset	183	23	264	267	148	885	146
Julkiset palvelurakennukset	61	6	147	151	91	457	64
Tuotantorakennukset	317	32	846	363	304	1863	224
Vapaa-ajan asuinrakennukset	130	2	31	9	9	182	0
						0	
asuinrakennukset yhteensä	1616	225	1074	215	273	3402	102
palvelurakennukset yhteensä	243	29	412	418	239	1341	209
asuin- ja palvelurakennukset yhteensä	1859	254	1485	633	512	4743	312
kaikki rakennukset yhteensä	2306	288	2363	1004	825	6788	536

Kuva 15. Keskimääräinen sähkötehon tarve viikkotasolla ulkolämpötilan ollessa 0 asteessa (Järventausta ym. 2015).

Asuinrakennusten kuormitus käyttäytyy suurin piirtein samankaltaisesti, jos ne jaotellaan rakennusvuoden ja lämmitystavan perusteella. Suomessa pientalojen osuus on 34 % kerrosalasta. Näistä lämmitysmuodoksi 44 % on valinnut sähkölämmityksen. (Järventausta ym. 2015; Tilastokeskus 2019.)

Kerrosalan perusteella 7 % on rivitaloja, joiden osuudesta noin 30 % on sähkölämmitteisiä. Muita lämmitysmuotoja käyttävät rivitalot ovat kuormanohjauksen kannalta haastavia, koska säätöpotentiaali on pientä. Kerrostalokohteet, joiden osuus rakennusala-asta on 21 %, ovat heikommin hyödynnettäviä, koska suurimmat yksittäiset kulutukset ovat

autolämmitys, kiukaat sekä peseytymistilojen lattialämmitys. (Järventausta ym. 2015; Tilastokeskus 2019.)

Eri toimitila- ja palvelukiinteistöjen, joiden osuus on 37 % kerrosalasta, kulutuslaitteet ja käyttäytymismallit vaihtelevat huomattavasti. Sähkökulutusta voidaan vain tutkia järjestelmä- tai laitetyyppitasolla. Toisaalta rakennuksissa on käytössä paljon yleisemmin jonkintasoista kiinteistöautomaatiota, jota voitaisiin hyödyntää kuormien ohjauksessa. (Järventausta ym. 2015; Tilastokeskus 2019.)

### 3.2 Kysyntäjoustop kehityssuunnat

Sähköjärjestelmän kestävän kehityksen ja tehokkuuden kannalta kysyntäjousto on erinomainen resurssi. Kysyntäjousto vaikuttaa toimitusvarmuuden parantamiseen, uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiseen, parempaan markkinakilpailuun sekä asiakkaiden vaikutusvallan lisääntymiseen. Kysyntäjousto on mukana Euroopan energiatehokkuusdirektiivissä sekä sisällytetty lakiehdotuksiin puhtaampien energiamarkkinoiden kehittämisessä. (SEDC 2017.)

Kuitenkin kysyntäjoustoan liittyen havaittiin kohtia, joita pitäisi ottaa kehityksen alle Euroopan tasolla sekä selvittää edellytyksiä (SEDC 2017):

- Markkinoiden yhteneväisyys.
- Kuluttajien osallistuminen markkinoille.
- Yhteistyö tasehallintamarkkina osapuolten välillä.
- Aggregaattoreiden lisääntyminen.
- Jakeluverkkoyhtiöiden kannustinjärjestelmät.

Kysyntäjousto ja kuluttajien vaikutusvalta ovat mukana puhtaan energian paketissa, koska ne auttavat saavuttamaan kilpailukykyisen, kestävä ja turvallisen talouden (SEDC 2017). Lyhyesti puhtaan energian paketilla tarkoitetaan Eurooppa-neuvoston hyväksymiä ilmasto- ja energiatavoitteita. Tavoitteiden tarkoituksena on vähentää kasvihuonepäästöjä sekä nostaa uusiutuvan energiantuotannon osuutta. (Eduskunta 2016.)

Työ- ja elinkeinoministeriön perustama älyverkkotyöryhmä pitää tärkeänä, että asiakkaalla on mahdollisuus aggregaattoreiden tai omien valintojen kautta osallistua joustoon. Älyverkkotyöryhmän tavoitteena on parantaa asiakkaiden osallistumismahdollisuuksia aktiivisesti sähkömarkkinoille ja myötävaikuttaa toimitusvarmuuden ylläpitoon ja parantamiseen. Työryhmä, jossa on jäseniä niin sähkön kuluttajien, jakeluverkkoyhtiöiden, myyjien, viranomaisten ja tutkimuslaitosten puolesta, perustettiin 2 vuodeksi. Työryhmä ehdotti myös, että vuoden 2021 aikana luovutaan kokonaan yö sähköohjauksesta. Tämän seurauksena siirryttäisiin markkinaehtoiseen kulutuksen ohjaukseen. Kulutuksenohjaus olisi tarkoitus siirtää sähkömyyjien ja markkinatoimijoiden vastuulle. (Pahkala ym. 2018; Työ- ja elinkeinoministeriö 2018.)

Aggregaattorit nähdään tulevaisuudessa tarpeellisena toimijana, jotka keräävät yhteen kuluttajia, pientuotantoa sekä sähkövarastoja ja ohjailisi heidän sähkökäyttöänsä. Aggregaattorit siis toimivat välikätenä ohjaamassa ja myymässä sähköenergiapotentiaalia sähkömarkkinoille ja he voisivat halutessaan toimia myös sähkömyyjinä. Monilla kuluttajilla ei ole mahdollisuutta osallistua suoraan markkinoille, joten aggregaattorit loisivat sopimuksia eri kuluttajien kanssa tarjotakseen markkinoille kulutuksen kasvattamista tai pienentämistä. Kulutuksen muutos voisi olla, esimerkiksi kuluttajien lämmityskuorman ohjausta. (Pahkala ym. 2018; Palola 2016; SEDC 2017.)

Kysyntäjouaston laajamittainen hyödyntäminen vaatii kuitenkin vielä paljon muutoksia toiminnallisuuksiin, rooleihin, markkinamalleihin, tiedonsiirtoon sekä lainsäädäntöön. Tärkeänä kuitenkin pidetään asiakkaiden tietoisuuden lisäämistä. (Järventausta ym. 2015.)



### 3.3 Kysyntäjousto markkinoiden näkökulmasta

Nykyhetkellä kysyntäjousto voidaan määrittää kahteen eri vaikutusperusteeseen: markkinaehtoinen jousto ja pakkotilanne. Markkinaehtoinen perustuu joustotarjouksiin, jotka on ennakkoon jo määritelty valmiiksi. Pakkotilanteella tarkoitetaan tilannetta, jossa tehopuolassa joudutaan pakko-ohjaamaan kulutusta vähemmäksi, jotta sähköjärjestelmä voidaan pitää vakaana. (Segerstam ym. 2007.)

Korvaus kysyntäjoustopuolelta voidaan jakaa kahteen seuraavaan malliin. Voidaan käyttää kannustinpohjaista tai hintaperusteista säätöä. Kannustinpohjaisessa kuluttajat saavat suoraan korvauksen muuttamalla kulutustaan. Hintaperusteisessa kulutusta säädetään markkinahinnan mukaan ja saadaan säästöjä siirtämällä kulutusta pois kalliiden tuntien hetkiltä. (SEDC 2017.)

Markkinoiden avaaminen kysyntäjoustopuolelta on perusedellytys jouston kehittymisen kannalta. Suomessa ollaankin useilla toimenpiteillä mahdollistettu kysyntäjoustopuolelta osallistuminen. Esimerkiksi kysyntäjoustopuolelta voidaan osallistua kaikkiin sähkömarkkinaryhmiin, vaikkakin niissä on vielä tiukkoja rajoitteita. Käytännössä kysyntäjousto on hyväksytty taajuusohjattuun häiriöreservimarkkinaan, mutta muitakin markkinakohteita ollaan pilottimaisesti ottamassa käyttöön. (SEDC 2017.)

Reservimarkkinoiden hyödyntämistä varten tarvitaan vielä teknistä kehitystyötä, jotta saataisiin parannettua kannattavuutta. Esimerkiksi reaaliaikaisemmat markkinat tarjoavat parempaa kannattavuutta. Lisäksi uusiutuvan energiamuodon kasvamisen vuoksi arvioidaan sähkön hintavaihtelujen kasvavan, joka siis tarkoittaa taas kysyntäjoustopuolelta saattavien taloudellisten voittojen kasvua. (Järventausta ym. 2015.)

Toisaalta kysyntäjoustopuolelta tarjoamista eri markkinoille on mietittävä tarkkaan, sillä esimerkiksi kovin montaa peräkkäistä tuntia asiakkaan kulutuksesta ei voida myydä. Pääsääntöisesti reservien tarve on ollut puolesta tunnista kahteen tuntiin, mutta on ollut tilanteita, jolloin joustoa tarvittaisiin pidemmäksi ajaksi käyttöön. (SEDC 2017.)

Kysyntäjoustopuolelta haasteena onkin saada houkutelua kuluttajia mukaan markkinoille tarkkailemaan sähkönhintaa ja kulutustaan. Yksittäiset asiakkaat eivät koe olevansa merkittävässä roolissa osallistuakseen tehotasapainon säilymiseen. Toisaalta kuluttajat eivät halua kokea haittaa sähkönkäytön rajoittamisesta vaan sen täytyisi toimia automaattisesti. (Farin, Kärkkäinen, Pihala 2005; Segerstam ym. 2007.)

### 3.4 Jännitteensäädöllä toteutettu kysyntäjoustopuolelta

Jännitteensäädöllä toteutetussa kysyntäjoustopuolelta saadaan kuluttajia joustopuolelta vaivattomasti, siitä ei koidu heille mitään näkyvää haittaa eikä heidän tarvitse muuttaa kulutustottumuksiaan. Toisaalta heidän kuormituksensa osallistuvat joustopuolelta ns. pakotetusti, koska yksittäisiä kuluttajia ei voida jättää ulkopuolelle joustopuolelta sähköasematasoisen säädön vuoksi. On kuitenkin syytä huomioda, että pienennettäessä jännitteitä standardin rajoissa, tuskin kuluttajat edes huomaavat muutoksia sähkölaitteissa eikä se vaikuta heidän käyttäytymiseensä. Kyseinen keino onkin potentiaalisesti helppo ja kustannustehokas tapa saada sähkömarkkinoille uutta säätöpotentiaalia.

Kuormanohjaus tyyppinen kysyntäjoustopuolelta edellyttää sähkökäyttäjiltä ohjausjärjestelmää sekä sen taakse kytkettäviä kuormia. Lisäksi joustopuolelta saatavat hyödyt eivät yleensä kata tarvittavista muutostöistä aiheutuvia kuluja tällä hetkellä. Kuormanohjaus vaikuttaa enemmän kuluttajiin riippuen ohjaustyyppien toimintaperusteista. Toiminnolla kuitenkin ohjataan kyseinen kulutuslaite kokonaan pois päältä, jolloin kyseisellä hetkellä se ei ole käytettävissä. Esimerkiksi lämminvesivaraajasta voi loppua kuuma käyttövesi, jos vedenkäyttö on keskittynyt sopivasti tietylle hetkelle ja lämminvesivaraaja on silloin varattuna joustopuolelta.

Käämikytkimellä suoritettavan kysyntäjoustopuolelta vuoksi sähköasemille tehtävää investointitarvetta ei ole. Kuluttajien ei tarvitse miettiä ohjauslaitteita, koska joustopuolelta osallistuttisiin verkkoyhtiön kautta, muuttamalla sähköaseman käämikytkimellä jännitteitä verkosta. Täten saataisiin vaikutettua tehoihin niin ylös- kuin alassäädön osalta riippuen mihiin suuntaan jännitettä säädetään.

Tällä hetkellä verkkolaskentaohjelmistolla voidaan selvittää mahdolliset jännitteensäätörajat tiettyjen parametrien sisälle, johon vaikuttavat kulutusprofiilit sekä säädön toteuttamisaika. Laskennassa ei kuitenkaan saada käyttöön reaaliaikaista tietoa kentältä, vaan käytetään historiapohjaisia kulutustietoja, joten säätömenetelmä ei voi olla tarkka, vaan säädön toteutukseen jouduttaisiin jättämään turvamarginaalit. Toteutus vaatisi yhteyttä verkkotietojärjestelmään sekä käytönvalvontajärjestelmään, jonka kautta ohjattaisiin käämikytkintä. Tällä tavoin jännitesäätö muuttuisi aktiiviseksi vastaamaan erilaisia kuormitus- ja kytkentätilanteita verkossa. Nykyään kuitenkin käämikytkimen kautta säädettävä kiskoajännite on vakioitu ennakkoon aseteltuun tavoitearvoon.

Mielenkiintoisen seikan aiheuttavat AMR-mittarit, joita periaatteessa voitaisiin hyödyntää myös jännitteiden säätöön. Mittarit sisältävät jännitteiden mittauksen kulutuspiisteistä, mutta mittausta ei ole pystytty hyödyntämään muuhun kuin jännitehälytyksiin. AMR-mittareiden uusin sukupolvi on tuomassa tähän muutoksen, sillä uudet mittarit on määriteltä lähettämään jännitearvoja yläjärjestelmään (Elenia 2017a). Muutoksen seurauksena tiedettäisiin tarkat jännitearvot jokaisesta kulutuspiisteestä.

## 4 JÄNNITTEENSÄÄDÖN TOTEUTUKSIA

Jännitteensäädöllä voitaisiin vaikuttaa jonkin verran energiankulutukseen. Jännitteen alentamisen tarkoitus on vähentää pätö- ja loistehokulutusta. Useimmat kuormitukset reagoivat pienempään jännitteeseen ottamalla vähemmän tehoa. Tietenkään jokainen kuormitus ei reagoi samalla tavalla, mutta suuremmassa mittakaavassa kulutuksen pienentymistä tapahtuu. (León, Diaz-Aguiló & Raza 2016.)

Jännitteen alentamista on tutkittu ja toteutettu erilaisilla optimointimenetelmillä, kuten jännitteensäädöllä tai jännite/loisteho optimoinnilla. Toiminnon nimi on vaihdellut eri yritysten tekemissä testeissä, mutta kaikkien päätavoitteena on ollut hakea säästöjä jännitteen alentamisen avulla. (León ym. 2016.) Osa testeistä on etsinyt säästöjä pitkäaikaisesti eli energiansäästömielessä kun taas osa on keskittynyt kulutuksen siirtoon eli kysyntäjoustoon. Ulkomaisessa kirjallisuudessa on käytetty muun muassa termiä *Conservation voltage reduction*, joka on yksi termi jännitteensäädöllä haettavista säästöistä.

Sähkövoimajärjestelmän kokoonpano on vaikuttanut jännitteensäädön toteuttamiseen. Jännitteitä on voitu joissain paikoissa säätää useilla eri verkkokomponenteilla ja niiden säätimillä. Yleisin on muuntajan käämikytkin, joka säätää koko sähköaseman jännitettä. Joissain tapauksissa jännitteensäätöä on hajautettu verkkoon, kuten kondensaattoriparisitojen tai jännitteenkorotusmuuntajien avulla. (León ym. 2016.)

Jännitteensäätö, erityisesti alaspäin, ei ole uusi konsepti. Monet sähköyhtiöt ovat käyttäneet jännitteen pienentämistä useiden vuosikymmenien ajan tehon pienentämiseksi huipukuormitushetkien sekä tehopulien aikana. (Ardis & Uuski 2015.) Esimerkiksi jännitteen alentamista on käytetty Yhdysvalloissa jo 1960-luvulla hätätilanteissa pienentämään tehokysyntää. Jännitteensäätömenetelmä syntyi kauppasaarron aikana 1970-luvulla, mutta kauppasaarron loppumisen jälkeen menetelmä unohtui historiaan. (León ym. 2016.) Suomessa jännitteiden alentamista on käytetty esimerkiksi Jämsän Sähkö Oy:ssä 1980-luvulla tehon rajoittamiseksi. Kovien sähkönkulutushetkien aikana on käämikytkimestä laskettu jännitettä, jotta välttyttäisiin tehon liialliselta kasvulta. (Vuorinen 2019.)

#### 4.1 Kysyntäjouston osallistuminen jännitteensäädöllä

Sähköjärjestelmän tasapainottamiseen tilanteesta riippuen tarvitaan kykyä säätää tehoa suuremmaksi tai pienemmäksi, joten kysyntäjouston osallistuminen voi olla ylös- tai alaspäin säätöä. Jännitteensäätö olisi tästä mielekäs ratkaisu, koska sen avulla voidaan vaikuttaa tehoihin kasvatus- tai pienentämistarkoituksessa.

Välittämättä jännitteen alentamisen tavoitteista, tulee asiakkaiden jännitteiden laatu pitää laatukriteerien sisällä. On huomioitava, että alentaminen tekee laitteista entistä alttiimpia häiriöille kuten jännitekuopille. Esimerkiksi kun jännitteiden pienentämispotentiaali lasketaan mallinnetuista verkoista, voivat todellisessa verkossa kuormitukset muuttua enemmän kuin mallissa, jolloin asiakkaiden kokemat jännitteet voivat olla standardien ulkopuolella. Täysimääräisen optimoinnin hakemiseen tarvittaisiin lähes reaaliaikaista tietoa jakeluverkon tilasta. (León ym. 2016; Markushevich & Chan 2009.)

Tulevaisuudessa kysyntäjouston osallistuminen jännitteen muuttamisella voi olla haastavampaa, jos kuluttajilla yleistyvät kuormienohjauslaitteistot. Silloin erilaisten kuormitus-tilanteiden ennustaminen muuttuu haastavammaksi. Tätä varten ehdotuksena olisi hyödyntää AMR-mittareilta saatavaa reaaliaikaista tietoa kulutuksesta. (Markushevich & Chan 2009.)

Jännitteensäädön tehokkuuden arviointi kiinnostaa montaa osapuolta. Halutaan selvittää kuormituksissa tapahtuvat muutokset sekä laskea hyödyt talouden näkökulmasta. Laskenta ei ole valitettavasti vielä vakiintunut, vaikka ajatuksena toiminta on yksinkertainen. Eroa pitäisi vertailla siihen, kun säätöä käytetään verrattuna arvoon, kun säätö ei olisi samaan aikaan käytössä. Eli toisin sanottuna, kuinka paljon energiaa olisi kulutettu tietynä aikana ilman joustamista verrattuna mitattuun energiankulutukseen jouston aikana. Kysyntäjouston suorituskyky on näiden kahden arvon erotus. Erilaisia keinoja on käytetty laskemiseen, kuten samankaltaisen päivien vertailua, tilastollisia analyysejä sekä sääntöihin perustuvaan arviointia. Mallit ovat kuitenkin epätarkkoja, koska kulutuksen arviointi on haastavaa. Säädettävä määrä olisi tärkeä saada selville, sillä kysyntäjoustosta yleensä maksetaan kysyntämuutosten perusteella. (Roytelman & Medina 2016.)

## 4.2 Referenssit muualla

Jännitteen alentamista kysyntäjoustoja ja energiansäästämistä varten on jo tutkittu vuosikausien ajan. Yhdysvalloissa ei ole kumminkaan ollut suurempaa tarvetta sen käyttöön- otolle, koska kyseistä ominaisuutta ei ole koettu niin tärkeäksi. Ilmaston lämpeneminen, kasvihuonepäästöt, kestävä kehitys ja energian käytön lisääntyminen ovat herättäneet idean uudelleen. Esitettyjen tutkimuksien painopiste on keskittynyt hivenen enemmän säästöihin kuin joustoon. (Sen & Lee 2014.) Sekä säästö- että joustotarkoituksissa tehtyjen testien tuloksia voidaan käyttää apuna, kun tutkitaan jännitteen vaikutuksia kuormiin.

Useat yritykset ovat testanneet jännitteen alentamista saaden laajan kirjon erilaisia tuloksia. Testien onnistuminen on riippunut kuormituksen luonteesta sekä järjestelmän kokoonpanosta. Esimerkiksi resistiivinen kuorma reagoi parhaiten pienempään jännitteeseen tuoden energiasäästöjä. Lämmityksessä oleva resistiivinen kuorma vähentää tehoa, mutta energiankulutus pysyy vakiona termostaattiohjauksien vuoksi. Moottorikuormalle ei ole havaittu jännitteen pienentämisestä mitään hyötyä, sillä ne tarvitsevat vakiotehon. Enemmänkin koneita haittaavat suuremmat virrat ja häviöiden kasvaminen. Useissa kuormituslaskelmissa käytettiin luvussa 2.5 esitettyä ZIP-mallia. (León ym. 2016.)

Jännitteen pienentämiseen on nykyään kaksi menetelmää, joita yleisesti käytetään. Ensimmäinen keino on käyttää laskennallisia tuloksia. Säästöpotentiaali lasketaan lähdön impedanssimallin perusteella, johon vaikuttavat johtolähdön virta tai kuormitusmalli. Toinen tapa pienentämiseen on, että johtojen loppupään jännitteitä mitataan ja sen perusteella annetaan toimintarajat. Välttämättä kaikkea mittaustietoa kentältä ei käytetä vaan säätöön osallistuvat vaan esimerkiksi alempia jännitetasoja kokevat mittarit. (León ym. 2016.)

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi aiemmin tehtyjä jännitteensäätötestauksia kysyntäjoustoja ajatellen.

#### 4.2.1 Case I

Yhdysvalloissa Virginian alueella paikallinen sähköjakeluyhtiö on suorittanut vuonna 2009 tutkimuksia jännitteen alentamisesta saatavista hyödyistä.

##### *Toteutus*

Heidän tutkimuksessansa käytettiin AMR-mittareiden jännitetietoa suoraan liityntäpisteistä. Jänniteensäätöalgoritmiin valittiin alimmat jännitemittausarvot säätämään jännitettä. Kaikki 10 000 mittaria pystyivät antamaan hälytyksiä jännitearvon poikkeamisesta. Käyttämällä asiakkaiden sähkömittareita hyödyksi, saatiin kentältä oikea reaaliaikainen jännitetieto. Tällä tavalla ei jouduttu arvioimaan mahdollisia ylikuormitettuja jakelumuuntajia tai liiallisia jännitteenalenemisiä. (Peskin, Powell & Hall 2012.)

Ensisijaisen testauksen tarkoitus oli havaita energiansäästöpotentiaali. Testauksia suoritettiin 'päivä päällä ja päivä pois' -menetelmällä. Testauksessa seurattiin päämuuntajan kuormitustehoja jokaiselle tunnille. Rinnalla seurattiin myös ulkoisten muuttujien vaikutusta, kuten lämpötilaa ja päivätyyppiä. (Peskin ym. 2012.)

##### *Tulokset*

Aluksi testausta suoritettiin yhdessä muuntopiirissä, mutta tutkimusta laajennettiin lopulta koskemaan kahtatoista muuntajaa. Mittaustuloksiin huomioitiin ulkoisten muuttujien vaikutusta sekä suoritettiin analyysyjä, jotta CVR-arvo saataisiin selvitettyä. CVR-tekijäksi saatiin 0,92 sekä havaittiin, että jänniteensäätöpotentiaali oli vuoden aikana 1–4 %. (Peskin ym. 2012.)

Testauksessa havaittiin, ettei mallinnettu KJ-jännite ollut luotettava tekijä arvioimaan testauksen aikaisia liittymäjännitteitä. Eräillä alueilla kaupunkien kasvaminen oli ollut nopeampaa kuin verkon investointikehitys, joten kyseiset lähdöt saattoivat jäädä maaseutuverkkoja heikommiksi. Kuitenkin pääsääntöinen tekijä oli syötön pituus. PJ-verkko vaikutti suurimmaksi osaksi jännitealenemisiin. Maakaapeleiden havaittiin pitävän

parempaa jännitetasoa, mikä johtui niiden vahvemmassa mitoituksessa ilmajohtoihin nähdessä. (Peskin ym. 2012.)

Asiakkaiden suunnalta testauksesta saatu palaute oli ollut positiivista. Lisäksi energiansäästö mielessä oli arvostettu keinoa, jossa heidän ei tarvinnut muuttaa käyttäytymistä. (Peskin ym. 2012.)

#### 4.2.2 Case II

Tässä käydään läpi tapausta, jossa sähköverkkoyhtiö otti käyttöön kaupallisen järjestelmän jännitteensäätöön. Järjestelmän tarkoituksena oli pienentää kysyntää kuormitushuipputaakilla sekä energian kulutusta vuositasolla. Mittaustuloksien pohjana on Yhdysvaltojen Kaliforniassa suoritettut testaukset. (Giorsetto & Kirshner 1984; Sunderman 2012.)

##### *Toteutus*

Jännitteensäätö toteutettiin usealla sähköasemalla samaan aikaan, mutta tuloksia tutkittiin yhden sähköaseman osalta. Kyseisen sähköaseman perässä oli teollisuus-, toimitila- ja kotitalouskuormaa. Kyseessä oli vielä maaseutupainotteiset lähdöt, joissa oli käytössä erillisiä jännitteensäätäjiä. Jännitteiden ohjaukseen käytettiin johtolähtöjen loppupäiden jännitemittauksia. Testausjaksot suoritettiin 'päivä päällä ja päivä pois' -menetelmällä. Loppupäiden jännitteiden raja-arvoksi annettiin noin 4 % pienempi arvo kuin normaali ohjearvo olisi ollut. (Sunderman 2012.)

##### *Tulokset*

Testausjaksien perusteella CVR kertoimeksi määritettiin 0,7 yhdelle lähdölle, joka oli tilastollisesti luotettavin. Kertoimen vaihteluväli oli silti 0,16–1,19 välillä. Muiden lähtöjen osalta tulokset olivat enemmän arvioita ja ne vaihtelivat 0,4–0,6 välillä. Mittausten perusteella sähköasemasta sekä sen lähdöistä muodostettiin malli simulointiohjelmaan. Mallilla saatiin arvioitua, että vuosittainen energiansäästö voisi olla 0,16–1,2 %, jos jännitteensäätö olisi koko ajan käytössä. (Sunderman 2012.)



Testissä havaittiin huippukuormitushetkillä yhden lähdön kärsivän ajoittain suurista jännitteen alenemisista. Jännitteensäätöalgoritmi kuitenkin nosti kyseisillä hetkillä jännitettä. (Sunderman 2012.)

#### 4.2.3 Case III

Seuraavassa tapauksessa tutustutaan tutkimukseen, jossa jännitteen alentamista toteutettiin Yhdysvaltojen laajuisesti. Kyseisiä järjestelmiä on jo käytössä, mutta niiden vaikutusta ei ole arvioitu tarkasti suuremmassa kaavassa (Schneider, Fuller, Tuffner & Singh 2010).

##### *Toteutus*

Schneider ym. (2010) arvioi jännitteen alentamisesta saatavia hyötyjä simulointiohjelmaan rakentamalla mallillaan, jonka pohjana käytettiin todellisia lähtöjä. Mallissa olevat lähdöt olivat luonteeltaan erilaisia, niissä oli huomioitu erilaisia ilmasto-olosuhteita sekä kuormitusprofiileja. Teollisuus-, toimitila- ja kotitalouskuormat jaettiin vielä tarkempiin lohkoihin, jotta mallista saataisiin tarkempi. Malliin hahmoteltiin kuormitusten kausittaista ja päivittäistä vaihtelua. Kuormissa otettiin huomioon, onko niissä lämpötilaohjausta vai ei. Mallina käytettiin ZIP-menetelmää, joka oli laajennettu termostaattikuormalla. (Schneider ym. 2010.)

Mallit rakennettiin lisäämällä yksittäisiä rakennus- ja kuormitustyyppjä, jotta mallista saatiin todellisten SCADA-mittausten kanssa suhteellisen samankaltaiset. Simulointi suoritettiin vuoden mittaiselle jaksolle yhden minuutin simulointitarkkuudella. Eri kuormitustyypit laskettiin erillisinä, että voitaisiin selvittää erilaisten kuormitustyyppien käyttäytymismallit jännitteitä muutettaessa. Ensiksi simuloitiin normaalilla jännitteellä ja sen jälkeen jännitteen alentamisen ollessa käytössä. Näiden simulointien jälkeen vertailtiin energiankulutuseroja. (Schneider ym. 2010.)

### *Tulokset*

Tuloksista havaittiin, että huippukuormitus pienenee sekä energiankulutus vähenee. Simuloitujen tulosten perusteella havaittiin, että 22 lähtöä 24 lähdöstä saavutti 0,5–4 % kuorman pienentymisen, kun jännitettä pienennettiin. (Schneider ym. 2010.)

Mallissa havaittiin, että energiankulutuksen vähentäminen on kahden tekijän vaikutus: kuinka paljon jännitettä voidaan pienentää ja mikä on syöttöjohdon kuormituksen määrä. Jännitteensäädön hyödyntämisellä huomataan, että johtojen loppupisteen jännitteet taasaantuvat, kun jänniteohjaus muutettiin johdon loppupää perusteiseksi verrattuna kisko-jännitteen mukaiseen säätöön. Pidettäessä jännite jatkuvasti lähellä säätövaran alarajaa, havaitaan vuotuisen energiankulutuksen pienenevän selvästi. Suurin osa säästöissä tapahtuu loppukuormissa ja vain noin 2 % häviöissä. Skaalaamalla tulokset Yhdysvaltojen laajuiseksi, vaikutukset olisivat huomattavia. Tehon tuotantotarve olisi jopa 6 500 MW vähemmän. (Schneider ym. 2010.)

#### 4.2.4 Case IV

Tässä luvussa tutustutaan New Yorkissa sijaitsevan sähköverkkoyhtiön pohjalta muodostettuun mallinnukseen.

### *Toteutus*

Tutkimuksessa rakennettiin kuormitusprofiilit tutkimalla kuluttajien käyttäytymistä. Selvitettiin kuormien luonteita, mitä laitteita käytetään, mitattuja sähköisiä ominaisuuksia sekä käyttöaikoja. Tutkimukseen otettiin mukaan sekä kodinkoneita että järjestelmiä asuintaloista. Mallia varten tutkittiin kuluttajia muun muassa eri suuruisista asunnoista. Liiketoiminta-asiakkaat valittiin liiketoiminnan perusteella, sillä niissä havaittiin, että eri ryhmissä jännitteiden muutokset vaikuttavat eri tavalla. Tosin teollisuudesta otettiin mukaan vain muutama kohde. Kuormituksen ollessa suurilta osin moottorikuormaa, jännitteen vaikutus todettiin olevan mitätön, joten päädyttiin teollisuus mallintamaan va-kiotehoisena. (León ym. 2016.)

Tässä esimerkissä muodostettiin malli, jossa keskijännitesyöttö on säteittäinen ja pienjänniteverkko on silmukoitu. Keskijänniteverkkoon on kytketty neljä erillistä jännitteensäädintä. Kuormien vaihtelut on luotu käyttäen mallinnettua ZIP-mallia. (León ym. 2016.)

#### *Tulokset*

Pätötehon osalta KJ-verkon puolella CVR-arvoksi saatiin 0,55 ja loistehon arvoksi 2,55. Säteittäisen pienjänniteverkon CVR-kertoimiksi pätötehon osalta saatiin 0,5 ja loistehon osalta 2,0. Huomattavaa on kuitenkin, että häviöt pysyvät samansuuruisina eri kuormitustilanteissa. Tutkimuksessa havaittiin, että alijänniteongelmat sijaitsevat yleensä paikallisesti pienillä alueilla. Tutkimuksessa todettiin, että kyseisessä verkossa jatkuva 4 % jännitteenalentaminen olisi mahdollinen, jos muutama standardin alitus jätettäisiin huomioimatta huippukuormahetkillä. (León ym. 2016.)

#### 4.2.5 Case V

Eräälle Yhdysvalloissa sijaitsevalle sähköyhtiölle otettiin käyttöön jännite/loisteho ohjaus sekä jänniteoptimointi. Järjestelmän tarkoituksena oli pienentää häviöitä, minimoida jännitevaihteluja, vähentää huolto- sekä käyttökustannuksia sekä mahdollistaa suurempi tehonsyöttökapasiteetti. (ABB 2014.)

#### *Toteutus*

Järjestelmässä hyödynnettiin kondensaattoriparistojen ohjausta ja jännitteensäätöjärjestelmää. Ohjaukseen hyödynnettiin reaaliaikaista valvontaa johtolähtöjen jännitteistä strategisista paikoista. Pilotin aikana järjestelmässä käytettiin 5 minuutin mittausväliä, myöhemmin siirryttiin 10 minuutin toimintajaksoihin. (ABB 2014.)

#### *Tulokset*

Testaus suoritettiin sähköasemalla, jossa on kaksi päämuuntajaa sekä kiskoa. Molemmilla kiskoilla oli lähes samankaltaisesti käyttäytyvät lähdöt/kuormat. Toisella kiskolla pidettiin CVR käytössä ja toisella ei. Taulukossa 3 on esitetty saadut tulokset, joissa on vielä

eritelty vuorokausi kahteen osaan. Huomattavaa, että päiväaikaan kulutetaan suurempaa tehoa ja silloin saavutettava pienennys tehoissa on suurempaa. Lisäksi mitattiin 'päivä päällä ja päivä pois' -menetelmällä keskiarvoiseksi CVR-kertoimeksi 1,05 koko vuorokaudelta. (ABB 2014.)

Taulukko 3. CVR testauksesta saadut tulokset (ABB 2014).

CVR käyntiaika	Keskiteho	Tehonmuutos säädössä	Prosentuaalinen tehonmuutos säädössä	CVR
24h (9.00–9.00)	9,86 MW	0,32 MW	3,1 %	0,93
15h (9.00–24.00)	11,46 MW	0,39 MW	3,3 %	0,98
9h (24.00–9.00)	7,62 MW	0,16 MW	2,0 %	0,56

Testissä saavutetut tulokset mukailivat aiempia tutkimuksia, jossa myöskin teho on pienentynyt jännitettä pienentäessä. Jännitteen alentaminen vaikutti sekä kysyntään että energian kulutukseen. Eli käyttämällä CVR-järjestelmää voidaan saavuttaa pienempi hiilijalanjälki, pienentää asiakkaiden sähkölaskua sekä antaa sähkömarkkinoille enemmän joustavuutta. (ABB 2014.)

#### 4.3 Yhteenveto tarkastelluista referensseistä

Sähköverkon jännitteenalenemien vuoksi standardin alaraja tulee herkästi vastaan ja sen selvittämiseksi tarvitaan aina erilliset laskelmat. Perinteinen jännite/loisteho-ohjaus on tehty SCADA- tai DMS-järjestelmässä, joiden apuna on tarvittu tehojakoa. Matemaattisilla malleilla voidaan muodostaa säätöalgoritmeja, mutta ne ovat monimutkaisia ja ongelmallisia. Tämän vuoksi jännite-/loistehosäätöä on usein käytetty rajoitetusti. (Roytelman & Medina 2016.)

Ratkaisuna olisikin yhdistää eri teknologiaratkaisuja yhteen. AMR-mittareiden sekä DMS-järjestelmän yhteensovittaminen olisikin koettu edistävänä tekijänä. Saatujen tulosten perusteella lähes kaikki jännitteensäätöoperaatiot vaikuttivat kulutukseen ja kuormitusten kokonaistehoihin. Yhteenvetona case-esimerkkien perusteella CVR-kertoimet vaihtelivat pätötehon osalta 0,2–1,2 välillä. Pääsääntöisesti arvot olivat lähempänä arvoa 1,0. Useiden testien perusteella jännitteenalentamispotentiaali oli luokkaa 1–4 % riippuen lähtöjen ominaisuuksista. Loistehoa tutkittiin ainoastaan yhdessä esimerkissä, jossa CVR-kertoimeksi saatiin n. 2,5. Huomionarvoista olikin, että pienikin muutos suuremmassa mittakaavassa olisi hyödyllistä selätettäessä energiamurroksen tuomia vaikutuksia.

## 5 TEHDYT LASKELMAT JA TESTAUKSET

Tässä luvussa käydään läpi työssä tehdyt testaukset valituilla sähköasemilla, jotta voitaisiin määrittellä Elenian verkkoalueelta saatava kysyntäjoustopotentiaali. Ennen kuin testauksiin päästään, pitää suorittaa sähköverkkolaskentaa tarkasteltavien sähköasemien valitsemiseksi ja säätökykyisten asemien määrittelemiseksi. Seuraavaksi keskityttiin selvittämään jokaisen sähköaseman kulutusprofiilimallit, joita voitaisiin hyödyntää joustopotentiaalin määrän tarkennuksessa. Jännitteensäädön kysyntäjoustopotentiaalin testauksia varten tarvittavat testijärjestelyt kuvataan tämän luvun loppupuolella. Viimeisenä esitetään testien tulokset ja johtopäätökset.

### 5.1 Sähköverkkolaskenta

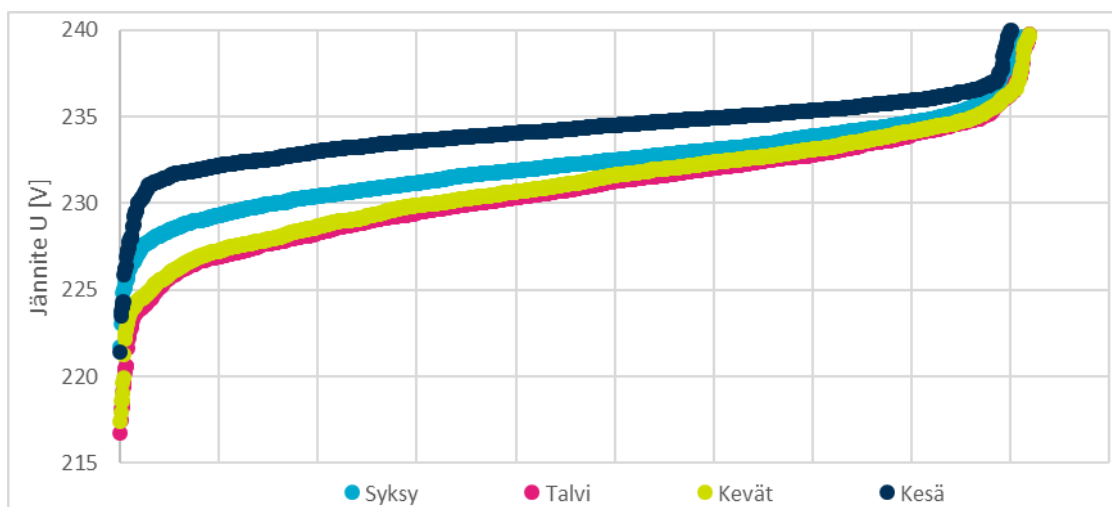
Elenia Oy:llä on käytössä Trimble NIS verkkotietojärjestelmänä, jolla hallitaan verkko-omaisuutta. Kyseisessä järjestelmässä ovat tuettuina seuraavat ominaisuudet: verkostolaskenta, verkon suunnittelu ja rakentaminen, omaisuudenhallinta, verkkoinvestointien hallinta ja kunnossapito (Trimble 2019). Tätä tutkimusta varten hyödynnettiin verkostolaskentaominaisuuksia, jonka avulla laskettiin jännitteenalenemat keski- että pienjänniteverkossa. Laskentaominaisuuksista pelkkä tehojakolaskenta on tässä tutkimuksessa riittävä; kyseistä ominaisuutta hyödynnetään yleisesti tarkistettaessa verkon komponenttien oikea mitoitus.

Kuormitusmalli muodostaa laskennan ydinosan, mikä luodaan tyypillisten käyttäjäryhmien kulutussarjojen perusteella tai todellisten mittausten indeksisarjojen perusteella. Verkon laskenta voidaan laskea vapaasti haluttuna aikavälinä tunnin ja kalenterivuoden väliltä. Lisäksi kuormitusmalleihin voidaan ottaa huomioon kuormitusennusteita. Kuormitusmallin perusteella voidaan laskea tehojako, jonka pääsääntöiset tulokset ovat kuormitusvirrat sekä jännitteet. Laskenta tuottaa lisäksi muita tuloksia, kuten tehohäviöt ja energiahäviöiden kustannukset. Pienjännitelaskennassa laskenta-algoritmi ottaa myös huomioon dokumentoidun jakelumuuntajan väliottokytkimien asennon. (Trimble 2017.)

Sähköasemien käämikytkimet on aseteltu pitämään oletuksena kiskojännitettä 20,6 kV arvossa. Keski-jännitejohdon osalta jännitteenaleneminen lasketaan NIS-laskentaparametreihin määritellyn kiskojännitteen perusteella. Laskennassa arvot päivittyvät muuntamoille. Pienjänniteverkossa laskenta suoritettiin käyttäen jänniteprofiiliparametria, joka hyödyntää KJ-verkon laskennallisia jännitteenalenemia laskettavilla muuntamoilla. Tehojakolaskennassa hyödynnettiin todellisia kuormitusprofiileita, jotka perustuvat AMR-mittareiden lähettämiin kulutustietoihin jokaisesta käyttöpaikasta. (Trimble 2018, Trimble 2017.)

Koko Elenian verkkoalueelle suoritettiin jännitteenalenemalaskenta. Kuormitusmalleissa päätettiin käyttää neljännesvuosimallia, jossa vuoden ajanjaksot olivat joulukuu–helmikuu, maaliskuu–toukokuu, kesäkuu–elokuu ja syyskuu–marraskuu. Valitut ajanjaksot pyrittiin muodostamaan samankaltaisen sääolosuhteiden perusteella. Esimerkiksi suurimassa osin verkkoa on talvella pakkasten aikaan enemmän kuormitettuna kuin kesällä lämmityskauden ulkopuolella. Kuormitus vaikuttaa oleellisesti jännitteenalenemiin johdolähdöillä. Tarkoituksena on määrittää mahdollinen jännitteensäätövara eri ajanjaksoina Elenian sähköasemilla.

Kuvassa 16 on esitetty esimerkiksi Jyrängön sähköaseman perässä olevien liittymäpisteiden jännitteet. Jännitearvot on järjestetty pienimmästä suurimpaan selkeyden vuoksi. Kuvasta havaitaan, että lämmityskaudella jännitteenalenemat ovat selvästi suurempia kuin kesällä. Siksi kesällä jännitteensäätövara on paljon suurempi kuin talvella. Esimerkiksi talvella asiakkaiden liittymispisteiden jännitteet voivat olla huonoimpana käyttöhetkenä lähempänä standardin alarajaa. Jännitteensäädössä pyrittiin pysymään standardin  $\pm 10\%$  antamissa rajoissa.



Kuva 16. Jyrängön sähköaseman perässä olevien liittymäpisteiden huonoimmat jännitteet eri aikajaksolla.

Laskenta antaa määritellylle ajanjaksolle sen sisällä olevan huonoimman tilanteen. Kuvassa 16 esitetyt jännitteet ovat siis aina huonoimpia eli kuormitetuimpia hetkiä verkossa. Laskennan perusteella havaittiin, että suurimman osan ajasta jännitteet ovat parempia, mutta hetkellinen suuri kuormituspiikki tai mittausvirhe alentaa niitä. Varsinkin AMR-mittausten siirto tietokannasta laskentaohjelmaan aiheuttaa tietyissä tilanteissa suuria virheitä tehojakolaskentaan. Esimerkiksi AMR-mittarin ollessa yhteydettömässä tilassa pitkiä aikoja, aiheuttaa se laskentaohjelmaan kulutuspiikin kyseiselle hetkelle, kun mittari saa yhteyden ja lähettää aikaleimatut mittaukset eteenpäin. Kaikki yhteydettömän ajan kulutustiedot tulevat laskentaohjelmaan yhdelle tietylle ajanhetkelle, jolloin ohjelma tulkitsee sen suureksi kuormaksi ja aiheuttaa laskentaan liian suuret jännitteenalenemat. Yleensä yhden liittymispisteen huomattava kuormitus vaikuttaa koko PJ-lähdön jännitteenalenemaan, jolloin useat muutkin liittymispisteet voivat joutua jännitstandardin ulkopuolella. Tällaiset suuret poikkeamat on käytävä käsityönä läpi, joten osa sähköasemien säätökyvystä on saattanut jäädä heikommaksi kuin todellisuudessa ovat. Selvästi virheelliset mittaukset on poistettu tässä työssä esitetyistä liittymäpistejännitteistä.

Määriteltäessä mahdollisia sähköasemia, jotka voivat osallistua jännitteensäätöön, joudutaan huomioimaan mahdolliset poikkeavuudet sähköverkossa. Esimerkiksi jännitteensäätöpotentiaalia ei voida hyödyntää siltä sähköasemalta, joka on jouduttu korvaamaan toisen sähköaseman kautta. Tällaisia tilanteita esiintyy muuan muassa sähkönjakelun



suurhäiriöiden aikana, mahdollisten kunnossapitotoimenpiteiden tai uuden verkon käyttöönoton aikana.

Jännitteensäätöä keskijännite- ja pienjänniteverkossa voidaan aktiivisesti tehdä päämuuntajien käämikytkimiä ohjaamalla. Tehty jännitesäätö tapahtuu aina portaittain. Yleisemmin yhden portaatan suuruus on 1,67% nimellisjännitteestä, jolloin yhden asennon muuttaminen vaikuttaa kiskojännitteeseen noin 340 V ohjaamissuuntaansa.

NIS-laskennan perusteella muodostettiin taulukko 4, johon on koottu kappalemääräisesti sähköasemat säätömahdollisuuden mukaan. Jokaiselta Elenian sähköasemalta muodostettiin kuvan 16 kaltaiset jännitekäyttätymiskuvaajat. Kuvaajien perusteella määriteltiin, montako käämikytkimen porrasta jännitettä voidaan ohjata alaspäin 20,6 kV:n vakioarvosta kullakin sähköasemalla.

Taulukosta 4 havaitaan säädettävien sähköasemien määrän olevan suurimmillaan kesäaikana, jolloin yhteenlaskettu tehokin on pienimmillään. Kuormitusten kasvaessa jännitteensäätövara pienenee huomattavasti. Jotkin keskijännitelähdöt kuormittuvat talvella kuormituspiikkien aikana huomattavasti, jolloin ollaan jännitteen laadun osalta lähellä standardin alarajoja. Siten jokaisen sähköaseman säätövaran määrittelee kyseisen aseman takana olevan jakeluverkon alin jännite.

Taulukkoon 4 on laskettu yhteen säädettävien sähköasemien määrä sekä niiden yhteenlaskettu keskiarvoteho kyseisellä kaudella. Tehoissa on tuotu esille sekä pätö- että loistehojen määrät. Näitä arvoja voidaan käyttää hyödyksi, kun määritellään joustopotentialimäärä pätötehoista sekä tutkitaan sähköasemien loistehoon vaikuttamista jännitesäädöllä. Toiseen sarakkeeseen on määritelty asemat, jotka ovat ylittäneet –10 % rajan huippukuormahetkellä ja eivät ole käytettävissä säätöpotentialina. Kolmas sarake edustaa –10 % rajan läheisyydessä huippukuormahetkellä olevaa kapasiteettia, jota ei voida säätää ilman, ettei asetettu raja ylity. Neljäs sarake kertoo kapasiteetin, jossa jännitettä voidaan tiputtaa 1 askel alaspäin ja silloin vielä liittymäpisteet pysyvät asetetun rajan paremmalla puolella. Ja viides sarake kertoo taas kapasiteetista, jossa jännitettä voidaan tiputtaa kaksi askelta alaspäin.

Taulukko 4. Sähköasemien jännitteensäätöpotentiaali alaspäin sekä keskiarvotehot eri vuodenaikoina.<sup>1</sup>

Säätö- vara	Ei yhtään (-10 % rajan huonommalla puolella)	Ei yhtään	1 askel	2 askelta	Selite	Yksikkö
Talvi	8	25	45	55	Määrä	kpl
	85,4	164,0	257,8	267,3	Keskiarvopätöteho	MW
	-11,7	-25,5	-180,5	-24,2	Keskiarvoloisteho	MVar
Kevät	5	20	45	63	Määrä	kpl
	45,7	110,5	196,9	270,6	Keskiarvopätöteho	MW
	-12,7	-20,6	-48,6	-36,3	Keskiarvoloisteho	MVar
Kesä	0	2	8	123	Määrä	kpl
	0	7,5	33,9	397,7	Keskiarvopätöteho	MW
	0	-4,5	-11,6	-106,3	Keskiarvoloisteho	MVar
Syksy	3	9	32	89	Määrä	kpl
	32,0	57,9	148,8	392,8	Keskiarvopätöteho	MW
	-4,3	-21,2	-47,0	-50,5	Keskiarvoloisteho	MVar

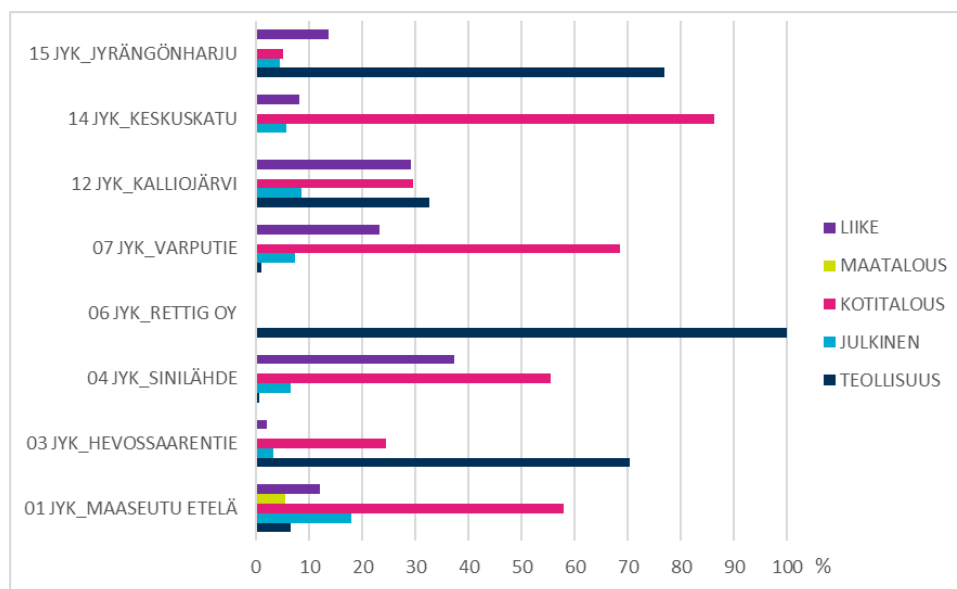
Voimakas maakaapelointiasteen kasvattaminen tulee pienentämään verkon jännitteenalennemia ja parantamaan verkon jännitejäykkyyttä. Eli vastikään rakennetut kaapelit on yleisesti mitoitettu tulevaa sähkökulutuksen kasvua ajatellen. Joten elinkaaren alkuvaiheessa ne pitävät parempaa jännitetasoa verrattuna vanhaan mahdollisesti alimitoitettuun syöttöön. Toisin sanoen sähköasemien säätökyky jännitteensäädön avulla tehtävän kysynnänjouston näkökulmasta paranee koko ajan.

<sup>1</sup> Taulukossa olevat tehot on kerätty 95 % Elenian sähköasemilta. Puuttuvista kohteista ei ollut mittaustietoa saatavilla.

## 5.2 Kulutusprofiilit

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus määritellä eri kulutustyyppien käyttäytyminen jännitteensäädön aikana, jotta voitaisiin tutkia, miten erilaiset lähdöt käyttäytyvät jännitteensäädön seurauksena. Tarkoituksena olisi määritellä jokaiselle sähköasemalle tarkempi säätöpotentiaali erilaisten kulutustyyppien käyttäytymisten perusteella.

Sähköasemat ja niiden lähdöt jaoteltiin energiankulutustyyppien perusteella. Testaukseen haluttiin ottaa mukaan mahdollisimman eri tyyppisesti kuormitettuja lähtöjä, jolloin voitaisiin yksinkertaisemmin vakioida kulutustyyppien käyttäytymismallit. Kuvassa 17 on nähtävillä esimerkiksi Jyrängön sähköaseman kulutustyyppien jakautuminen lähdöille. Kyseisen sähköaseman perässä on yksi lähtö täysin teollisuuskuormaa, sekä muutamia lähtöjä, jotka ovat vahvasti kotitalouslähtöjä. Harvemmissa sähköasemissa on selvästi edustettuina lähtöjä, jotka olisivat liike, maatalous tai julkisia kulutustyyppilähtöjä. Jokaiselle sähköasemalle määriteltiin niiden lähtöjen kulutustyyppit.



Kuva 17. Jyrängön sähköaseman johtolähtöjen kulutustyyppien jakautuminen eri ryhmiin.

### 5.3 Jännitteensäädön vaikutuksen testaus – Jyrängön sähköasema

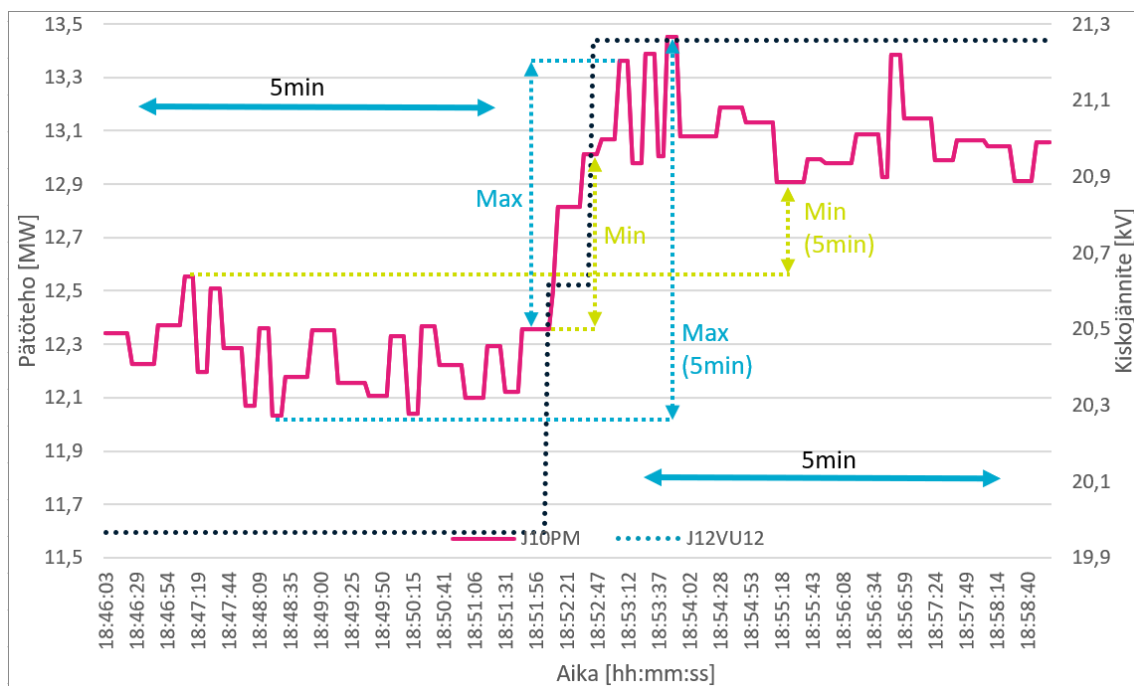
Ensimmäinen jännitteensäädön vaikutuksen testaus suoritettiin Jyrängön sähköasemalla, joka sijaitsee Heinolassa. Ensimmäisen testauksen tarkoitus on testata jännitteensäätöä käytännössä sekä saada testauksesta havaintoja tulevia testejä varten. Kohde valikoitui jännitelaskelmien ja erilaisten kuormitustyyppien perusteella. Lisäksi jakelualueella sijaitsee yli tuhat kappaletta uudentyyppistä AMR-mittaria, joiden hyödyntämistä mittaus-tarkoituksessa olisi tarkoitus tutkia. Kyseiset mittarit ovat ns. uutta mittarikantaa, joista saadaan laajemmin mittauksia tiheämmällä aikaikkunalla. Mittarit lähettävät esimerkiksi tehotietoja 5 minuutin mittausikkunassa, joita on tarkoitus hyödyntää tässä tutkimuksessa kuormien muutoksien tutkimiseen.

Ennen varsinaisia testejä laskettiin säätövara jokaiselle asemalle, jotta tiedettiin minkä alueen sisällä kiskojännite on pidettävä. Käytännössä testaus suoritettiin Elenian käyttökeskuksesta käsin, josta käytönvalvojat ohjasivat kyseisten sähköasemien käämikytkimiä ylös tai alaspäin useita kertoja. Jännitettä pidettiin pääsääntöisesti vähintään 10 minuuttia ääripäissään ennen kuin uusi säätömuutos toteutettiin.

AMR-mittareita hyödynnettiin myös muilla tavoin, kuten esimerkiksi jännitteiden valvonnassa. Elenian verkossa on tällä hetkellä eniten käytössä Iskramin valmistamia mittareita. Kyseisistä mittareista on mahdollista lukea vuorokauden suurimmat ja pienimmät tietyn aikajakson keskiarvojännitteet. Kyseiset mittarit myös lähettävät hälytystiedon DMS-järjestelmään, jos jännitearvo ylittää tai alittaa asetellut hälytysrajat. Vakioparametristen mittareiden jännitehälytysraja on säädetty niin pieneksi, ettei siitä ollut tässä testissä sellaisenaan hyötyä. Verkkolaskennan perusteella otettiin seurantaan muutama mittari, jotka saivat laskennan perusteella pienintä jännitettä. Kyseisten mittareiden alajänniterajaksi määriteltiin -10% raja, sekä suoritettiin manuaalista luentaa vuorokauden huonoimpien jännitteiden osalta. Mittausten perusteella seurattiin jännitteiden ylä- ja ala-arvoja testauksen aikana.

Teho- ja jännitemuutoksia seurattiin SCADA-järjestelmästä jokaisen lähdön osalta. Mittausdata käsiteltiin Excel-laskentataulukossa, jotta sitä saatiin analysoitua tarkemmin.

Luonnollisten tehovaihteluiden häiriön minimoimiseksi tutkittavassa tehomuutoksessa muodostettiin seuraavanlainen laskentatapa. Käämikytkimen toiminta-aikojen alku ja loppupuolelta etsittiin minimi- ja maksimimuutos tehoissa, joista laskettiin keskiarvo. Lisäksi muutoshetken kohdasta laskettiin eteen- ja taaksepäin viiden minuutin keskiarvot. Näistä kahdesta erilaisesta tehojen laskentatavasta muodostettiin vielä keskiarvo, joiden perusteella saatiin tehonmuutos jännitteensäädön vaikutuksesta. Kuvassa 18 on esitetty graafisesti muutoksen keskiarvolaskenta.



Kuva 18. Keskiarvoisen tehon laskeminen jännitteensäädön vaikutuksesta. Kuva perusteella laskettiin kaksi keskiarvoa; säädön aikainen sekä selvästi säädön ulkopuolelta 5 minuutin aikaikkunasta.

Laskentataulukossa huomioitiin lisäksi lähtöjen keskiarvot, joihin rinnastettiin muutunut teho määrä, jokaisella säätökerralla. Analysointien perusteella laskettiin tehonmuutosmäärä megawatteina sekä prosentteina käämikytkimen yhden askelluksen seurauksena.

Taulukkoon 5 on koostettu tehonmuutosten keskiarvot Jyrängön sähköasemalla. Tehonmuutoksissa, jos arvo on positiivinen, ovat tehot käyttäytyneet jännitteensäädön suuntaan. Eli jos jännitettä ollaan pienennetty ja saatu teho muutos on positiivista, on lähde

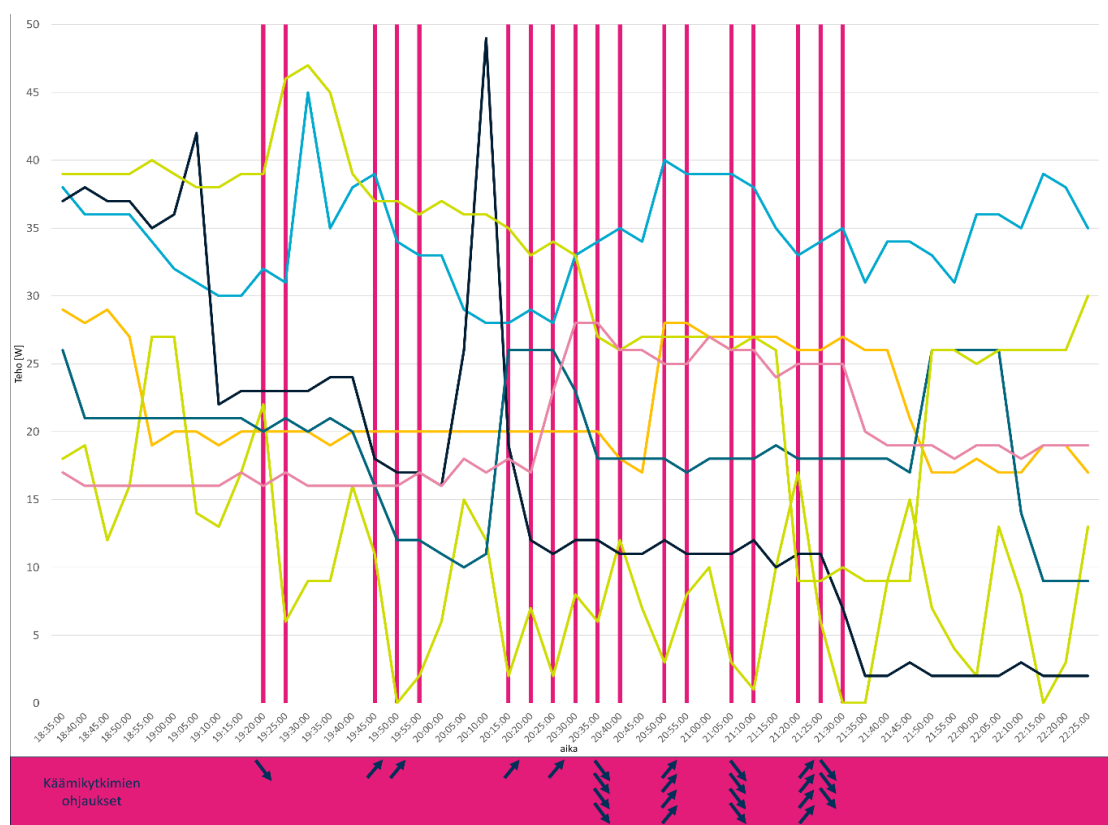
tapahtunut kulutuksen pienentymistä. Lähtötunnuksessa oleva Q-tunnus osoittaa kyseisen lähdön loistehomittauksen. PM-tunnuksella ilmaistaan päämuuntajalähtöä eli syöttöä sähköaseman kiskolle. Taulukossa on ilmoitettu maakaapelointiaste, jonka vaikutusta tutkitaan, kun verrataan useampia asemia keskenään. CVR-kerroin vastaa jännitteen muutoksen suhdetta tehonmuutokseen, kuten kaavassa 2 on esitetty.

Taulukko 5. Ensimmäinen testivaihe Jyrängön sähköasemalla.

Lähtö	Keskiarvo-teho	Tehonmuutos 1 askelluksen osalta	Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta	CVR	Kaapelointiaste [%]
J09 (PM)	10,5 MW	0,21 MW	2,03 %	1,37	61
J14	1,2 MW	0,02 MW	1,77 %	1,18	93
J09Q (PM)	0,01 MVar	0,14 MVar	182,8 %	123,04	61

Taulukosta 5 havaitaan, että tehot muuttuvat selvästi jännitteensäädön suuntaan Jyrängön sähköasemalla. Kun käämikytkintä ajetaan ylös- tai alaspäin, saavutetaan tehossa noin 2,0 % muutos. Huomattava muutos havaitaan kyseisen aseman loistehon muutoksissa. Toisaalta loistehon määrä on pieniä, joten mittauksen tulkinnoissa voi silloin olla epätarkkuutta.

Uudentyyppisiltä AMR-mittareilta saatua mittaustietoa tutkittiin tehon osalta, kun jake-lujännitteitä muutettiin sähköasemalla. Tehoista oli tarkoituksena tutkia muutoksia, kun jännitteitä nostettiin tai laskettiin. Nykyiset uuden mittarit ovat 5 minuutin teholuennalla. Mittauksen perusteella ei kumminkaan voitu muodostaa minkäänlaista korrelaatiota tehoihin jännitemuutoksien perusteella. Asiakkailta tapahtuvat luonnolliset tehonmuutokset olivat yleisesti niin suuria, että mahdolliset tehonmuutokset jännitesäädön vuoksi jäivät havaitsematta. Tämän seurauksena mahdollinen tehoseuranta AMR-mittareilta päätettiin pudottaa pois jatkotutkimuksesta. Kuva 19 edustaa otantaa muutaman mittarin mittauksista tehoista. Kuvasta voidaan havaita, että mitatut tehot vaihtelevat hetkittäin, eikä yhtenäisyyttä käämikytkimien muutosten yhteydessä ole oikein havaittavissa.



Kuva 19. AMR-mittareilta tehotiedot sekä käämikytkimien ohjauksien määrät ja suunnat nuolilla ilmaistuna. Pystyviivat edustavat aikaväliä, jolloin käämikytkintä on ohjattu.

Ensimmäisen testin jälkeen havaittiin Jyrängön asema huonoksi testauskohteeksi jatkoon kannalta. Asemalla on käytössä SPA-tiedonsiirtoprotokolla, jonka ominaisuuksien vuoksi pieniä mittausmuutoksia ei saatu SCADA-järjestelmään asti tarkasti. Lähinnä tarkkoja mittauksia saatiin ulos vain syöttökentästä, koska sen kokonaistehossa tapahtuvat muutokset olivat tarpeeksi suuria, jotta ne välittyivät SCADAan. Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa päädyttiin hyödyntämään IEC61850-tiedonsiirtoprotokollaa käyttäviä sähköasemia. Uudempaa protokollaa hyödyntävät sähköasemat välittävät mittauksia tarkemmin pienemmistäkin muutoksista, koska sen konfiguraatioihin on määritelty mittauksien välitys herkemäksi.

Mittausten perusteella havaittiin ongelmia NIS-verkkolaskennassa. NIS-järjestelmä olettaa, että mittareilta saatu kulutusenergiatieto on tasaisesti jakautunut kolmelle vaiheelle. Todellisten mittauksien vaihejännitteet saattoivat vaihdella paljonkin liittymäpisteiden

mukaan. Esimerkiksi raju vinokuormitus on ongelmallinen, jolloin yksi vaihe voi olla erityisen suuresti kuormitettu verrattuna kahteen muuhun. Tällaisissa tilanteissa tämä yksi liittymispiste ja sen yksittäinen vaihe rajoittaa koko sähköaseman jännitteiden alentamiskykyä.

#### 5.4 Testaukset eri vuodenaikoina – 4 uudempaa sähköasemaa

Seuraavaksi testiin otettiin mukaan 4 sähköasemaa, jotka kaikki tukevat IEC61850-prokollaa. Kyseiset sähköasemat valikoituivat mukaan erilaisten maantieteellisten sijaintinsa perusteella. Pirkkala syöttää suurimmaksi osaksi taajama-asuinaluetta Pirkanmaan alueella, Rovoksen sähköasema syöttää taajama-asuinaluetta Etelä-Pohjanmaalla, Vihtakan kaan sähköasema taas enimmäkseen maaseutua Keski-Suomen alueella ja viimeisenä Rantsilan sähköasema Pohjois-Pohjanmaalla maaseutua. Näiden lisäksi kyseisillä asemilla on laajin kirjo selvästi eri kulutustyyppisiä lähtöjä edustettuina.

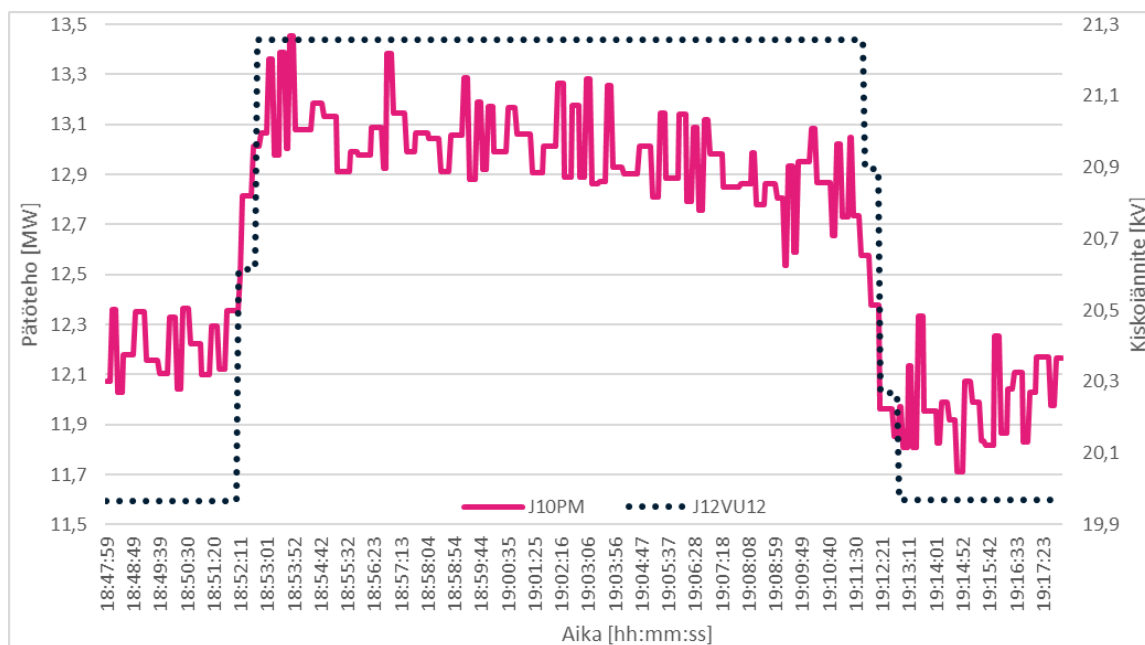
NIS-laskennan perusteella kaikilla asemilla on varaa ajaa käämikytöntä kaksi askelta joko alas tai ylös nimellisjännitteestä kaikkina vuodenaikoina. Haastateltaessa sähköverkon käytöstä vastaavia henkilöitä, päädyttiin Vihtakankaan sähköasemalla säätää käämikytöntä vain yksi askel alaspäin. Kyseisen aseman perässä on herkkä teollisuuslaitos, jonka tuotantoon ei haluttu aiheuttaa häiriöitä jännitteiden vaihtelujen vuoksi.

Kaikilla neljällä sähköasemalla on lähtöjä, joissa on runsaasti kotitalouskulutusta. Rantsilan sähköasemalla on paljon maatalouskuormaa ja lisäksi yksi lähtö on lähes kokonaan liiketoimintakuormaa. Kolmelta muulta sähköasemalta löytyy lähes puhtaita teollisuuslähtöjä. Kulutustyyppinä julkinen palvelu on heikoiten edustettuna lähdoissä; yksi löytyy Pirkkalasta noin 40 % osuudella. Liitteessä 1 on tarkemmin esitelty sähköasemien lähtöjen kulutustyyppien jakautuminen.

Kuvassa 20 on havainnollistettu tehomuutos jännitteensäädön neljän portaan muutoksella. Tehot selkeästi muuttuvat jännitteen suhteen, mutta tarkkojen muutosten määrittely on haastavaa, sillä teho vaihtelee koko ajan. Jännitemuutoksia päädyttiin tekemään ns.



äärilaidasta äärilaitaan, koska silloin arvoihin saatiin selkeitä muutoksia, eivätkä muutokset huku tavallisten tehomuutosten kohinaan niin herkästi.



Kuva 20. Pirkkalan sähköaseman syöttökentän jännite- ja tehomuutokset.

Näiden valittujen asemien osalta haluttiin tutkia, kuinka eri vuodenaajat vaikuttavat jouston määrään. Kuten luvussa 3.1.2 todettiin, kasvaa sähkönkulutus ulkolämpötilan funktiona. Esimerkiksi pakkasilla onkin enemmän resistiivistä lämmityskuormaa verkossa, joka käyttäytyy kysynnänjoustovasteen näkökulmasta erinomaisesti jännitteenmuutoksen seurauksena. Tämän analysoinnin avulla pyritään saavuttamaan tarkempaa tietoa joustopotentialinmäärän käyttäytymisestä.

Liitteessä 2 on esitetty mittaustulokset tehdyistä kokeista. Mittaustuloksia saatiin tässä testissä lähes kaikilta lähdöiltä, jotka olivat tarpeeksi kuormitettuja. Lähes 0 MW teholla kuormitetut lähdöt tiputettiin pois, koska kyseisten lähtöjen analysointi mittaustarkkuuden heiketessä ei olisi antanut relevantteja tuloksia. Kaikilla lähdöillä tapahtuvan luonnollisen tehojen vaihtelujen vuoksi tehojen muutoksien tulkitsemisessa on epätarkkuutta. Tuloksissa on havaittavissa sitä suurempaa hajontaa, mitä vähemmän kyseistä lähtöä on kuormitettu. Vaikka pienemmissä tehoissa tapahtuu sama prosentuaalinen muutos, on se hankalampi havaita, koska tehoissa tapahtuva muutos on suhteellisen pieni.

Mittauksien perusteella muodostettiin 4 erillistä taulukkoa jokaiselta testattavalta sähköasemalta. Taulukoissa on jaoteltu tulokset eri kausille. Työssä päädyttiin tutkimaan kausittain tapahtuvaa muutosta. Kesäkausi jouduttiin kuitenkin jättämään pois, koska se ei sopinut työn aikaikkunaan. Sen sijaan talvella suoritettiin kaksi testiä, joista toinen suoritettiin kovien pakkasten aikaan ja toinen tavallisen keskiarvoisen talvilämpötilan aikaan. Tällä lisätestillä pyrittiin saamaan tuloksia, kun verkossa on mahdollisimman paljon lämmityskuormaa kytkettynä.

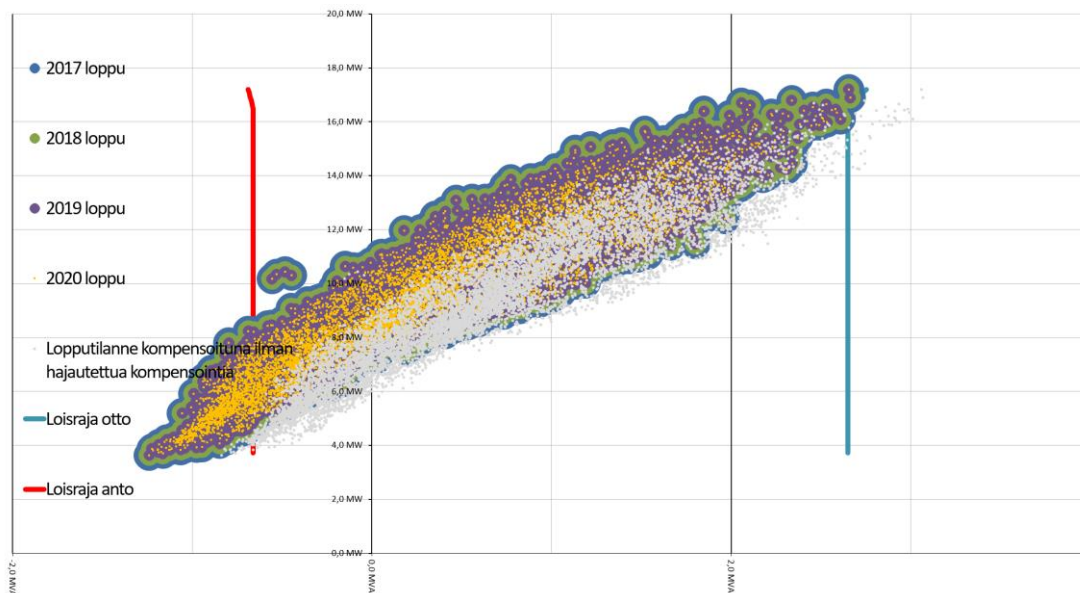
## 5.5 Loisteho

Loistehon muutokset sähköasemilla on saatu arvioitua edellisen luvun testauksien perusteella. Verkkoyhtiö on erityisesti kiinnostunut loistehon osalta, kuinka sen aiheuttamia kustannuksia saataisiin vähennettyä. Varsinkin Fingridin laskuttamat loistehomaksut ovat nousseet esille. Elenialle maksuja kertyy lähinnä kapasitiivisen loistehon ylitettyä loistehoikkunan raja-arvot. Induktiivinen ylitys ei niinkään ole ongelma, sillä niitä tapahtuu harvemmin. (Peltola 2019.)

Loistehomaksuista aiheutuvien kustannussäästöjen laskeminen on monimutkainen prosessi, jota tässä diplomityössä todellisessa tarkkuudessa ei suoriteta. Tarkempi arviointi vaatisi huomattavasti tarkempaa selvitystä. Tässä työssä lasketaan maksimaalista kustannushyötyä sekä arvioidaan todellista säästöä, jota voitaisiin saavuttaa jännitteensäädöllä loistehomaksuihin.

Loistehomaksuja syntyy vain silloin, kun teho ylittää loistehoikkunassa määritellyt rajat ja niistäkin vielä vähennetään 50 ylitystä pois. Tässä laskelmassa otetaan kantaa vain, kuinka paljon kustannussäästöjä syntyy, jos ikkunan ulkopuolella oltaisiin koko ajan. Sillä esimerkiksi, jos ollaan ikkunan sisäpuolella, niin silloin säädöllä ei vaikuteta loistehomaksuihin. Loistehot voivat vaihdella vuorokauden sekä vuodenajan perusteella, jolloin aika pienenee, milloin ollaan ikkunan rajojen ulkopuolella. Kuten kuvasta 21 on havaittavissa, Pirkkalan sähköaseman loisteho pysyy suurimmaksi osaksi ikkunan raja-arvojen sisällä. Kuvassa värikkäät pallot kuvaavat loistehomittauksia. Punainen ja sininen

pystyviiva kuvaavat ikkunan rajoja. Kuvasta havaitaan, että mittauksista noin 10 % on ylittänyt kapasitiivisen loistehorajan eli punaisen pystyviivan.



Kuva 21. Pirkkalan sähköaseman loistehoikkuna.

Loistehomaksuja syntyy vain sähköverkkoyhtiön ja Fingridin liityntäpisteiltä. Loistehomuutoslaskennat on suoritettu sähköasematasoisesti. Elenian verkossa liityntäpisteet Fingridin verkkoon sijaitsevat harvemmin sähköasematasoisesti, joten loistehomaksusäästöt on laskettu sillä ajatuksella, että loistehon kokonaismäärä pienenesi koko verkonlaajuisesti ja täten vaikuttaisi myös loistehomaksuihin.

Tehtyjen loisteholaskelmien perusteella havaittiin, että loistehosäädöstä on lähinnä apua, kun asemat ovat kapasitiivisella loistehoalueella. Koska Pirkkalan aseman loistehot ovat olleet lähes koko ajan induktiivisen puolella, ei sen tuloksia oteta huomioon, sillä induktiivinen loisteho on harvemmin ongelma. Taulukosta 4 havaittiin, että Elenian sähköasemien loistehojen keskiarvo on selvästi kapasitiivisella puolella, joten keskitytään sen kompensointiin. Lisäksi loistehot voivat vaihdella vuorokaudenkin sisällä paljonkin, joten loistehon käyttäytymisestä laskettiin keskiarvot muiden kolmen aseman osalta. Loistehon muutosarvoksi saatiin siten 2,90 % per käänikytkimen askellus.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa käydään läpi simuloinneista sekä testauksista saatuja tuloksia. Näiden testien tuloksia vertaillaan referensseihin maailmalta, jotta saataisiin selville jännitteensäädöllä saatavien tulosten paikkansapitävyys Suomessa. Luvun lopussa pohditaan teknistä toteutusmallia Elenialle.

### 6.1 Testauksista saadut tulokset

Tässä tutkimuksessa testejä tehtiin kolmena eri vuodenaikana. Olisi ollut myös mielenkiintoista tutkia jännitteensäädön vaikutusta tehojen muutoksiin kesäaikana. Työn tavoitteena oli määrittellä mahdollinen sähköaseman kiskojäännitteen muutoksella saavutettava kysynnänjoustopotentiali Elenian verkkoalueella. Taulukon 4 perusteella määriteltiin jännitteensäädön avulla kysyntäjoustoan kykenevät sähköasemat tiettyinä ajanjaksoina. Taulukkoon 4 laskettiin mahdollinen säätöteho käämikytkimen portaan suhteen. Portaittainen esitystapa päätettiin ottaa käyttöön sen vuoksi, että jännitettä ei pystytä säätämään lineaarisesti vaan aina käämikytkimen ominaisportaan suuruisesti.

Laskettaessa alassäätöpotentialia, voidaan säätövarana huomioida sähköasemat, joiden jännitteitä voidaan tiputtaa vähintään 1 askeleen verran. Lähes kaikkien sähköasemien jännitteitä voidaan nostaa ylöspäin. Kyseiset asemat, joiden jännitteitä voidaan säätää ylös tai alas, ovat sähkömarkkinoiden kannalta sekä tehon pienentämiseen että kasvattamiseen mahdollisia reservejä. Asemat, joissa pystytään tiputtamaan jännitettä yhden portaan verran, ovat säätöpotentialiltaan saadun keskiarvoisen tehonmuutosprosenttiosuuden sekä keskitehon tulo. Asemat, joissa pystytään jännitettä tiputtamaan 2 porrasta kerrallaan, voidaan muutosprosenttiosuus kertoa kahdella ja sitten laskea tulo keskitehon kanssa, josta saadaan säätöpotentialia kyseisten asemien osalta.

Seuraavissa aliluvuissa käydään tulokset läpi erikseen pätötehon ja loistehon osalta. Kuitenkin on muistettava, että verkkoyhtiöllä ei ole tällä hetkellä mahdollisuutta myydä kysyntäjoustoja markkinoille, josta voisi saada hyötyä pätötehon osalta (Sähkömarkkinalaki

2013). Loistehon osalta verkkoyhtiö voisi säätää jännitteitä SFS-EN 50160 -standardin antaman puitteiden sisällä ja saada mahdollisia säästöjä.

#### 6.1.1 Vaikutukset pätötehoon

Tarkasteltaessa tehojen muutoksia lähdöittäin, johtolähtöjen tehomuutosten ja kulutus-tyyppien välillä ei vaikuttaisi olevan suurempaa korrelaatiota. Tutkittaessa lähtöjä, jotka ovat suurimmaksi osaksi kotitalousasiakkaita, olivat niiden tehonmuutokset 1,2–2,3 %. Maatalouslähdoillä muutokset olivat keskimäärin 1,9 %. Teollisuuslähdoillä vaihtelut olivat 0,8–3,3 % välillä ja muut lähtötyypit 2 % lähellä. Keskiarvoisesti kaikkien sähköasemien pätötehomuutokset olivat noin 1,85 % käämikytkimen askellusta kohden. Tämän tutkimuksen perusteella päädyttiin tulokseen, ettei näin suppealla testijärjestelyllä voida määrittää tietyille kulutuslähdoille erityistä käyttäytymismallia.

Suoritettujen laskelmien perusteella havaittiin, ettei prosentuaalinen tehonmuutos selkeästi muutu eri vuodenaikojen välissä. Joten oletettiin, että joustomäärä on suoraan verrannollinen asemien keskitehoon. Laskelmista kerättiin tulokset sähköasematasoisesti taulukkoon 6 vertailun helpottamiseksi. Taulukossa on esitetty tehojen muutokset yhden portaan askelluksen suhteen.

Taulukko 6. Testauksien tulokset sähköasematasoisesti.

Lähtö	Keskiarvo- teho	Tehonmuutos 1 askelluksen osalta	Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta	CVR
Pirkkala	13,8 MW	0,25 MW	1,77 %	1,20
Rantsila	2,6 MW	0,06 MW	2,18 %	1,45
Roves	7,7 MW	0,15 MW	1,98 %	1,35
Vihtakangas	8,3 MW	0,12 MW	1,48 %	1,01
Keskiarvo	8,1 MW	0,15 MW	1,85 %	1,25

Asemat oli valittu mahdollisimman hajautetusti Elenian verkkoalueelta ja edustavat keskiarvoisesti Elenian verkkoalueelle jakautunutta kulutusprofiilia. Liitteessä 3 on vielä esitetty kulutustyyppit sähköasemittain. Maakaapelointiasteellakaan ei havaittu olevan vaikutusta tehojen muutoksiin. Joustopotentialimäärän laskennassa päädyttiin käyttämään keskiarvoista tehon muutosarvoa, jonka perusteella saatiin määriteltyä joustomäärä koko verkkoalueelta taulukkoon 7.

Taulukkoon 7 laskettiin säätövara käyttäen taulukon 4 teholaskelmia, jotka kerrottiin 1,85 % tehomuutoksella. Tehon pienentämismäärään hyödynnettiin tietoa siitä, että kuinka paljon sähköasemilla on säätövara alaspäin. Tiettyjä asemia pystyy säätämään vain yhden askeleen alaspäin ja osaa pystyy ajamaan kaksi askelta alaspäin. Kun säätövara on kaksi askelta, on tehonmuutoskin kaksinkertainen. Tehon kasvattamismäärä laskettiin oletuksella, että jokaisen sähköaseman jännitettä voitaisiin nostaa 2 askelta ylöspäin.

Taulukko 7. Säädettävä joustopotentiali eri vuodenaikoina Elenian verkkoalueelta.

Lähtö	Tehon pienentämismäärä	Tehon kasvattamismäärä
Talvi	14,7 MW	29,7 MW
Kevät	13,7 MW	24,0 MW
Kesä	15,3 MW	16,9 MW
Syksy	17,3 MW	24,2 MW
Keskiarvo	15,2 MW	23,7 MW

Keskiarvoisesti koko vuoden ajan Elenian verkossa olisi 15,2 MW säätövara alaspäin ja sen lisäksi ylössäätöön voitaisiin tarjota 23,7 MW säätöä. Kesällä säätöpotentiali vähennee pienempien tehojen vuoksi. Kyseinen kapasiteetti ylittää sähkömarkkinoiden minimitarjouskoon kaikille markkinaryhmille, joten tämä tekijä ei rajoita markkinaryhmän valintaa. Potentialin määrään kuitenkin vaikuttaa verkon käyttötilanne. Mahdolliset korvaustilanteet sekä myrskyt rajoittavat tarjottavaa potentiaalia käyttövarmuuden vuoksi.

CVR-arvoa käytettiin kuvaamaan tehojen käyttäytymistä verrattuna jännitteen muutokseen. Referensseissä saatu keskiarvoinen tulos oli noin 1,0 ja tämän tutkimuksen tuloksena kertoimeksi saatiin 1,3, vaihteluvälin ollessa 1,0–1,5. Tehot käyttäytyivät odotetun kaltaisesti ja saaduissa tuloksissa tehot säätyivät enemmän suhteessa jännitteensäätöön kuin referenssitesteissä. Tämä on seurausta siitä, että Suomessa on referenssejä enemmän resistiivistä kuormitusta sähkökiukaiden ja lämmityksen vuoksi. Täten voidaan olettaa, että tulokset ovat luotettavia.

### 6.1.2 Vaikutukset loistehoon

Kuten luvussa 5.5 todettiin, loistehon rahalliset säästöt tarvitsevat tarkempaa tutkimista. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi ns. maksimihyöty loistehosäädöstä ja sitten käydään läpi todellista tilannetta.

Tässä työssä saadulla loistehon muutosarvolla, on kerrottu sähköverkkolaskennalla selvitetty kapasitiivisen loistehon arvot. Taulukkoon 8 on laskettu loistehosäädöllä saatava kapasitiivisen loistehon pienenemismäärä Elenian verkkoalueelta ja siitä saadut kustannussäästöt. Kustannussäästöjä saadaan sekä loistehomaksuista että loisenergiomaksuista. Energian osuudessa oletettiin, että maksuja tulisi koko vuodelta. Yhteenlaskettu säästöpotentiaali voisi siten olla 0,94 milj. € vuodessa. Todelliset säästöt jäävät kumminkin kauas tästä arvosta, sillä keskiarvoisesti loistehot ovat ikkunan ulkopuolella vain noin 10 % vuotuisesta ajasta. Täten vuodessa saavutettava loistehon keskimääräinen pienenemismäärä voisi olla maksimissaan 0,59 MVAR ja saatava säästö olisi täten 94 000 € vuodessa.

Taulukko 8. Säädettävä loistehopotentiaali eri vuoden aikoina Elenian verkkoalueelta.

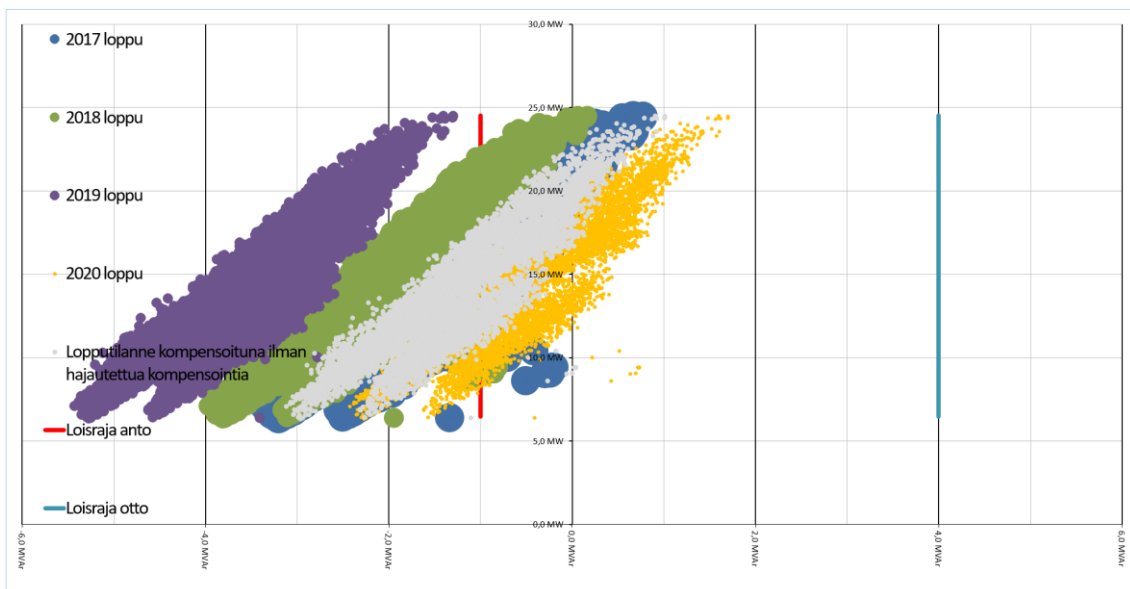
Lähtö	Tehon pienentämismäärä [MVAR]	Loistehomaksu [€]	Loisenergiomaksu [€]
Talvi	7,4	6600	297 000
Kevät	3,9	3500	157 000
Kesä	7,3	6500	291 000
Syksy	4,8	4300	192 000

Loistehomaksuista saatava säästö ei todellisuudessa ole edes 10 % yhteenlasketusta säästöpotentiaalista. Kyseinen arvo saadaan vain, jos jännitteet on optimoitu koko vuoden ajalta. Tulosta voitaisiin käyttää apuna kehiteltäessä keinoa loistehon optimointiin jännitesäädön avulla. Jokaiselta Fingridin liityntäpisteeltä voitaisiin muodostaa tilatieto, kun loistehoikkunan raja-arvot ylitetään. Kyseistä tilatietoa voitaisiin käyttää jännitteiden säätöön, jotta ikkunan ylitykset eivät olisi niin suuria kuin ilman optimointia. Kuitenkaan jännitesäätöä ei ole välttämättä tarvetta pitää koko ajan päällä. Elenian asiantuntijan mukaan kapasitiiviset loistehoikkunan ylitykset tapahtuvat kevyen kuormituksen aikana, jolloin myös säädettävä jännitepotentiaali voisi olla aiemmin esitettyä suurempaa.

Huomioidessa tulevaisuuden näkymät loistehon säädön kannalta, niin kuvassa 22 on havaittavissa erään liityntäpisteen loistehoparvet 4 vuodelta. Kuvassa on otettu huomioon



vuosittain kasvava kaapelointiaste, joka kasvattaa kapasitiivista loistehoa asteittain. Vuodesta 2017 vuoteen 2019 loistehoparvet siirtyvät koko ajan kauemmaksi ikkunan rajoista. Vuonna 2020 on suunniteltu asennettavaksi reaktori sähköasemalle, joten loistehoparvi, joka on esitetty keltaisella värillä, siirtyy lähemmäksi ikkunan sisäistä aluetta. Tämän perusteella tiedetään, että jossain tilanteissa jatkuva loistehosäätö voisi aiheuttaa koko ajan kustannussäästöjä. Kuitenkin Elenian asiantuntijan näkökohta on, että jännitteensäädöllä tehtävä kompensointi ei olisi pääsääntöinen keino, mutta säästöjä voitaisiin saavuttaa tällaisissa tilanteissa aina kun loistehosäätö olisi käytössä.



Kuva 22. Tyypillinen loistehon kehittyminen Fingridin liityntäpisteessä.

## 6.2 Tekninen toteutus

Pilottien ja testauksien aikana havaittiin, että NIS:llä suoritettujen jännitteenalennemalaskennat eivät pitäneet joka olosuhteessa paikkaansa. Virheitä aiheuttivat vääristyneet kulutusikäyrät, jolloin laskenta päättelee ne liian suureksi kulutukseksi. Ongelmia aiheutui myös kokonaiskulutustiedoista. Laskentaohjelma ei voinut päätellä vinokuormitustilanteita, koska energiatietoina käytetään vain kokonaistehoa eikä vaihekohtaista tehoa.

Tällä hetkellä verkossa olevat AMR-mittarit lähettävät alijännitehälytyksiä. Osa mittareista tosin lähettää haamuhälytyksiä ja mittarit ovat parametroitu standardin ulkopuoliselle alueelle. Nykyhetkiselällä mittarikannalla niiden hyödyntäminen oli hankalaa. Pääsääntöisesti Elenian sähköverkossa ei ole sähköaseman jälkeen aktiivisia jännitteenmittauksia, jotka tulisivat SCADA-järjestelmään asti. Testien perusteella havaittiin, että suuressa ongelmana saattoivat muodostua yksittäiset PJ-lähdöt enemmän kuin KJ-puolella tapahtuvat jännitteenalenemiset. PJ-verkossa AMR-mittarit ovat ainoita laitteita, jotka mittaavat jännitettä, joten niiden hyödyntäminen voisi olla mielekästä. Osassa referensseissä käytetyissä kohteissa olikin jo käytetty AMR-mittareita ja niiden jännitetietoa sähköasemalla tehtävään jännitteensäädön ohjaukseen.

Elenian seuraavan sukupolven mittarit ovatkin määritelty lähettämään vaihejännitteitä hetkellisarvoina (Elenia 2017a). Mielekkäintä olisi käyttää tätä uusien mittareiden ominaisuutta hyödyksi jännitteensäätöön. Useissa Case-esimerkeissä PJ-puolelle oli asennettu erillisiä jännitemittareita seuraamaan PJ-verkon arvoja. Hyödyntämällä uusia AMR-mittareiden jännitemittauksia, voitaisiin jännitteensäätöä suorittaa kustannustehokkaasti.

Uuden sukupolven AMR-mittareiden lähettämällä jännitearvoilla voitaisiin ohjata sähköaseman kiskoja jännitettä normaaleissakin tilanteissa. Esimerkiksi jos havaitaan tietyn muuntopiirin kuormittuvan ja jännitteiden tippuvan, voitaisiin sähköaseman jännitettä kyseisellä hetkellä nostaa. Toisaalta ominaisuutta voitaisiin hyödyntää mahdollisen säätöpotentiaalın selvittämiseen. Koko ajan tiedettäisiin jokaisen sähköaseman perässä olevien huonoimpien kulutuspiirien jännitteet, josta voitaisiin päätellä jännitteiden säätöpotentiaali ja siten toteuttaa käännytkimien ohjaus.

AMR-mittareiden jännitetiedon hyödyntäminen vaatisi yläjärjestelmää, jossa kaikkia jännitetietoja voitaisiin hallita tehokkaasti. Verkkotietojärjestelmästä voitaisiin saada tiedot mittareista, mitkä ovat minkäkin sähköaseman syötössä kiinni. Lisäksi vaadittaisiin rajapintayhteyttä käytönvalvontajärjestelmään, jonne voitaisiin rakentaa algoritmi jännitteensäätöä varten. Uusien mittareiden yhteyteen täytyisi rakentaa tehokas rajapintayhteys käytöntuki- ja käytönvalvontajärjestelmiin. Lisäksi kyseiset järjestelmät vaatisivat

ominaisuuksien kehittämistä, kuten jännitetietojen hyödyntämistä säädössä sekä tietojen välittämistä järjestelmästä toiseen.

### 6.3 Markkinapotentiaali

Säätösähkömarkkinoille osallistuminen tämän tutkimuksen lasketulla potentiaalimäärällä vaatii vielä työtä. Pitää miettiä keinoja, millä tavoin jakeluverkkoyhtiö toisi kyseisen säätöpotentiaalin markkinoille ja mille markkinapaikalle sitä olisi kannattavinta tarjota. Haasteena säätöpotentiaalin markkinoille saattamisessa on se, että sähkömarkkinalain mukaisesti reguloitu jakeluverkkotoiminta on tiukasti eriytetty muista sähköliiketoiminnoista. Siten jakeluverkkoyhtiö ei voi osallistua sähkömarkkinoille.

Itse verkkoyhtiölle mielenkiintoiseksi seikaksi jää loistehon optimointi jännitteensäädön avulla. Koko ajan kasvava kaapelointiaste verkossa kasvattaa loistehoa ja sen kompensoinnin tarvetta. Jos jännitteensäädöllä saavutetaan hyötyjä Fingridin liityntäpisteissä, saavuttaa verkkoyhtiö säästöjä loistehomaksuissa.

Sähköverkon ollessa pienessä kuormituksessa, jota yleensä tapahtuu kesäisin, kasvaa reaktiivisen loistehon määrä verkossa. Kesäisin verkossa on enemmän säätövaraa, koska jännitteenalenemat eivät ole silloin niin suuri ongelma. Loistehonsäädöllä voitaisiin silloin saavuttaa suurempia säästöjä. Nykytilanteessa talvisin loistehonsäädölle on tarvetta vain ajoittain. Loistehosäätö vaatii lisätutkimuksia sen tehokkaampaa käyttöä varten.

## 7 YHTEENVETO

Tulevaisuudessa tehotasopainon säilyttämiseen on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota. Joustamattoman tuotannon määrä kasvaa koko ajan. Ongelmaan on haettu ratkaisua kysyntäjoustopotentialin avulla. Perinteinen kuormanohjausjousto kuitenkin koetaan hankalaksi ja kustannustehottomaksi. Tässä diplomityössä keskityttiin uuteen lähestymistapaan kerätä kysyntäjoustopotentiaalia. Yleisesti jännitteen vaikutusta kuormiin on tutkittu kautta aikojen, mutta jännitteensäädöllä toteutettua kysyntäjoustopotentialia ei ole Suomessa paljoakaan tutkittu. Työssä tutkittiin erilaisten lähtöjen reagoitua jännitteenmuutokseen. Kyseisistä lähdöistä oli tarkoitus muodostaa tarkka reagointimalli jokaista kulutustyyppiä edustavalle lähdölle, tarkoituksenaan muodostaa mahdollisimman tarkka säätöpotentiaali Elenian verkkoalueelta.

Maailmalla on käytössä jännitteen alentamista käyttäviä järjestelmiä, joiden tarkoitusperä vaihtelee energiansäästön, joustopotentialin tai loistehon optimoinnin välillä. Eniten kyseistä ratkaisua on hyödynnetty energiansäästöä hakevissa järjestelmissä. Toimintatapa on kuitenkin samanlainen eli jakelujännitettä ollaan pienennetty, jolloin suurin osa kuormista reagoi vähentämällä sähkötehon tarvetta. Periaatteessa jännitteen alentamista voidaan pitää päällä hetken aikaa tai sitten pidempiä jaksoja. Mielekkääksi jaksottainen tapa tulee, kun joustopotentiaalia voitaisiin myydä sähkömarkkinoille. Sähkön myyjät, jakelijat ja tuottajat voisivat hyödyntää potentiaalia omiin tarkoituksiinsa. Toisaalta markkinoille myymisessä on lakitekniisiä haasteita, joka vaatii lisätutkimista markkinoiden näkökulmasta.

Työn tavoitteena oli määrittää tarkka joustopotentiaalimäärä Elenian verkkoalueella. Mittausdataa saatiin käytönvalvontajärjestelmästä suuria määriä; jokaiselta sähköasemalta ja lähdöltä, jotka olivat testissä mukana. Lopullisessa testissä tutkittavia lähtöjä oli yhteensä 24 kappaletta yhteensä neljältä sähköasemalta ja liityntäpisteiden määrä oli yhteensä yli 6500 kappaletta. Suoritetun tutkimuksen perusteella eri kulutusryhmien välille ei löytynyt selkeää eroa. Lisäksi testattavat sähköasemat käyttäytyivät testeissä suhteellisen samankaltaisesti.

Koko ajan muuttuva sähköverkko aiheuttaa mittaustulosten tulkintaan hieman epätarkkuutta, jonka vuoksi saavutetut tulokset vaihtelivat eri jännitteensäätökertojen väleissä jonkin verran. Pääsääntöisesti mittaukset seurasivat keskiarvoista tulosta. Tämän vuoksi yksittäisiltä testauskausilta laskettiin keskiarvo, että analysointia eri lähtöjen välillä pysytettiin tekemään. Lopulta vielä päädyttiin käyttämään keskiarvoa kaikista mittauksista määrittämään joustopotentiaali koko Elenian verkkoalueelta. Sähköasemat, jotka oli valittu tutkittavaksi kohteiksi, olivat kumminkin erilaisilla kuormitusprofiileilla sekä alueellisesti hajautettuina ja siten edustavat melko luotettavasti keskimääräistä Elenian verkkoaluetta.

Tuloksena havaittiin pätötehon muuttuvan 1,85 % asemien tehoista, kun säädetään jännitettä yhden käämikytkimen askeleen verran. Teho reagoi jännitteensäädön suuntaan eli jännitettä pienennettäessä tehokin pieneni ja sama logiikka toimi myös toisin päin. Koko Elenian verkkoalueelta saatiin tulokseksi, että keskimäärin alassäättöpotentiaalia olisi 15,2 MW ja ylöspäin tehoja voitaisiin nostaa 23,7 MW.

Yleinen linjaus tuloksissa oli samankaltainen kuin maailmalla saadut tulokset. Suurin osa kuormista reagoi halutulla tavalla jännitteensäätämiseen, vaikka osa käyttäytyi negatiivisesti. Sähköasemien laajuisesti tulokset olivat kuitenkin hyvinkin positiivisia, sillä tehot muuttuivat suuremmin suhteessa samaan jännitemuutokseen, verrattaessa tuloksissa referenssitestauksiin. Vuoden mittaan sähköasemien kuormitukset muuttuvat, mutta suhteelliset tehonmuutokset pysyivät samoissa linjoissa. Verkon ollessa raskaammassa kuormassa saatiin tehoissa aikaan suurempia muutoksia.

Työssä tutkittiin myös jännitteensäädöllä toteutettavan loistehonsäädön tuomia hyötyjä. Kyseinen aihe on kuitenkin laaja kokonaisuus, jonka tarkempi analysointi vaatii lisätutkimista. Työssä laskettiin loistehomaksuihin maksimaalinen säästö määrä testaus tuloksien perusteella. Säädettyvä loistehomäärä on 0,59 MVar ja sen seurauksena saavutettava säästö olisi 94 000 € vuodessa, jos oletetaan loistehosäädön olevan koko ajan käytössä.

Työssä käsiteltiin myös teknistä toteutusmallia, jonka avulla jännitteensäädöllä suoritettava kysyntäjousto olisi kustannustehokas. Mallissa tuotiin esiin uuden sukupolven

AMR-mittareiden hyödyntäminen jännitemittausominaisuuksien vuoksi. Kyseisenlaisia malleja oli myös toteutettu maailmalla hieman erilaisilla implementoinnilla. Jännitteen säädön täydellinen optimointi vaatisi uuden sukupolven mittareita, mutta siihen asti kuitenkin voidaan käyttää laskennallisia arvoja verkon käyttäytymisestä jännitteitä muutettaessa.

## LÄHDELUETTELO

ABB Oy (2014). Volt-var Optimization – A Case Study. ABB:n sisäinen lähde.

Ardis, Rob & Robert Uluski (2015). CVR Is Here to Stay. [Verkkodokumentti]. T&D World 26.8.2015 [5.2.2019] Saatavilla: <https://www.tdworld.com/grid-opt-smart-grid/cvr-here-stay>.

Bremer, Olli, Oona Frilander, Tuuli Kaskinen & Maria Malho (2017). Kysyntäjousto kuluttajan näkökulmasta. [Verkkodokumentti]. Demos Helsinki. [31.10.2018] Saatavilla: <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/Kysynta%CC%88jousto%20kuluttajan%20na%CC%88ko%CC%88kulmasta.pdf/>

Eduskunta (2016). *Komission puhtaan energian paketti*. 9.12.2016 [Online] 15.2.2019. Saatavissa: <https://www.parliament.fi/FI/tiedotteet/Sivut/Komission-puhtaan-energian-paketti.aspx>

EEP (2019). 4 Essential Features of Transformer On-Load Tap Changer. [Online]. [13.2.2019] Saatavissa: <https://electrical-engineering-portal.com/4-essential-features-of-transformer-on-load-tap-changer-oltc>

Elenia (2019). Verkkosivut [Online]. [12.2.2019].

Elenia (2017a). AMR 2030 – Seuraavan sukupolven AMR mittareiden määrittely. Elenian sisäinen lähde.

Elenia (2017b). Hallituksen toimintakertomus ja tilinpäätös 2017 [Online]. [17.9.2018] Saatavissa: <https://elenia.com/fi/vuosikertomukset>.

Ellens, Wendy, Adam Berry & Sam West (2012). A quantification of the energy savings by conservation voltage reduction. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2012, 30 October – 2 November 2012, New Zealand.

Elovaara, Jarmo & Haarla Liisa (2011). *Sähköverkot I*. 1. painos. Helsinki: Otatieto. ISBN 978-951-672-360-3.

Energiateollisuus (2018). Energiavuosi 2017 Sähkö [Online]. [12.9.2018] Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energia-vuosi\\_2016\\_sahko\\_sahkonkaytto\\_kaantyi\\_nousuun.html](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energia-vuosi_2016_sahko_sahkonkaytto_kaantyi_nousuun.html)

Energiateollisuus (2014). sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje [Online]. [13.9.21019] Saatavissa: [https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen\\_laatu\\_ja\\_toimitustapavirheen\\_sovellusohje\\_2014.pdf](https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf)

Energiavirasto (2017). Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta vuonna 2016 ja talvikaudella 2016 - 2017 sekä tehotase-ennuste talvikaudelle 2017 – 2018 [Online]. [12.9.2018] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Kertomus+s%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuudesta+2016.pdf/54e1bec1-4aea-4bac-992f-4bee7d89ad08>

Energiavirasto (2015). Energiaviraston suositus – Sähkö- ja maakaasuliiketoimintojen laskennallinen ja oikeudellinen eriyttäminen. Dnro 2449/421/2015. [Verkkodokumentti] [1.3.2019] Saatavissa: [https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Eriytt%C3%A4missuositus+2449\\_421\\_2015.pdf/b1e97829-3dca-48fd-8c2b-ee-faeaf7d4bb](https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Eriytt%C3%A4missuositus+2449_421_2015.pdf/b1e97829-3dca-48fd-8c2b-ee-faeaf7d4bb)

Eno, Heikki (2015). *Kapasitiivisen loistehon kompensointi sähköverkkoyhtiössä*. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Farin, Juho, Seppo Kärkkäinen & Hannu Pihala (2005). *Sähkön kysyntäjoustopotentialikartoitus teollisuudessa*. VTT [Online]. [19.9.2018] Saatavissa: [www.vtt.fi/inf/julkaisut](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut)

Fingrid (2018a). Suomen sähkönkulutus nousi kuluvan talven ennätyslukemiin [Online]. [12.9.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/>



suomen-sahkonkulutus-nousi-kuluvan-talven-ennatyslukemaan-noin-14-000-mega-wattiin-28.2.2018/

Fingrid (2018b). Verkkosivut [Online]. [12.9.2018].

Fingrid (2016). Sähköverkkopäivä 23.11.2016. [Verkkodokumentti]. [2.11.2018] Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/sahkoverkkopaivan\\_esitysaineisto.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/sahkoverkkopaivan_esitysaineisto.pdf)

Giorsetto, Paul & Daniel Kirshner (1984). Statistical test of energy saving due to voltage reduction. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 6, 1205-1210.

Hakola, Tapio (1984). Muuntajan suojaus. Teoksessa *Sähköasemat III, Suojaus-, mittaus- ja ohjausjärjestelmät*, II. Insinööritieto Oy. Helsinki.

Huikari, Tuukka (2016). *Loissähkönperiaatteet 2016*. Fingrid Oyj. 13.12.2016.

Jäppinen, Jonne (2014). *Joustavuuden lisääminen sähkömarkkinoilla*. Fingrid Oyj. Sähkömarkkinapäivä 2014.

Järventausta, Pertti, Sami Repo, Petri Trygg, Antti Rautiainen, Antti Mutanen, Kimmo Lummi, ... & Martti Honkiniemi (2015). Kysynnän jousto– Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti [Verkkodokumentti]. Tampereen teknillinen yliopisto. [25.10.2018] Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnan\\_jousto\\_loppuraportti.pdf](https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnan_jousto_loppuraportti.pdf)

Kenttälä, Atte-Ilari (2016). *Jakeluverkon loistehon hallinta*. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Diplomityö.

Kiviluoma, Jukka & Niina Helistö (2014). Selvitys Tehoreservin tarpeesta vuosille 2015–2020. [Verkkodokumentti]. Energiavirasto, VTT, 17.12.2014 [7.11.2018]. Saatavissa: [https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/VTT\\_Tehoreserviselvitys\\_2015\\_2020.pdf/150e5acd-06ec-49dd-94e6-dd169e7e7196](https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/VTT_Tehoreserviselvitys_2015_2020.pdf/150e5acd-06ec-49dd-94e6-dd169e7e7196).

- Kivimaa, Paula (2016). Uusi energia- ja ilmastostrategia, energiamurros ja 'luova tuho'. [Verkkodokumentti]. Smart Energy Transition, 30.11.2016 [4.1.2019] Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/uusi-energia-ja-ilmastostrategia-energiaturros-ja-luova-tuho>.
- Klasila, Henri (2017). *Loistehon kehitysnäkymät jakeluverkkoyhtiössä*. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Diplomityö.
- Koski, Anmari (2019). Tuotekehittäjä, Tuotteet ja palvelut. Elenia Palvelut Oy. Haastattelu, Tampere 8.3.2019.
- Lakervi, Erkki & Partanen Jarmo (2009). *Sähkönjakelutekniikka*. 2. painos. Helsinki: Ota-tieto. ISBN 978-951-682-359-7.
- León, Francisco, Marc Diaz-Aguiló & Ashhar Raza (2016). Conservation Voltage Reduction. In: *Smart Grid Handbook*. New York University, USA.
- Markushevich, Nokhum & Edward Chan (2009). Integrated voltage, var control and demand response in distribution systems. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009, 1 – 4 March 2009, Seattle, USA.
- Pahkala, Tatu, Heidi Uimonen & Ville Väre (2018). Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä, Älyverkkotyöryhmän loppuraportti [Verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriö, 24.10.2018 [30.10.2018]. Saatavissa: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/TEM\\_33\\_2018.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/TEM_33_2018.pdf)
- Palola, Ilkka (2016). *Kysynnäjouston pilottiprojekti*. There Corporation Oy. [Verkkodokumentti]. [20.9.2018] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysyntajouston-projektit/>
- Peltola, Jarkko (2019). Asiantuntija, Sähköasemat, Verkko-omaisuus ja investoinnit. Elenia Oy. Haastattelu, Tampere 12.3.2019.

- Peskin, Melissa, Phillip Powell & Edmund Hall (2012). Conservation voltage reduction with feedback from advanced metering infrastructure. Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 7–10 May 2012, Orlando, USA.
- Roytelman, Ilya & Jose Medina (2016). Volt/VAR control and Conservation Voltage Reduction as a function of advanced DMS. IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 6–9 September 2016, Minneapolis, USA.
- Schneider, K., J. Fuller, F. Tuffner & R. Singh (2010). Evaluation of conservation voltage reduction (CVR) on a national level. [Verkkodokumentti] Pacific Northwest National Lab. Richland, USA. [10.10.2018] Saatavissa: <https://www.osti.gov/biblio/990131>
- SEDC (2017). Explicit demand response in Europe - mapping the markets 2017. Smart Energy Demand Coalition. [Verkkodokumentti]. Brussels, Belgium. [14.11.2018] Saatavilla: <https://www.smartenergy.eu/wp-content/uploads/2017/04/SEDC-Explicit-Demand-Response-in-Europe-Mapping-the-Markets-2017.pdf>
- Segerstam, J., A. Junttila, J. Lehtinen, R. Lindroos, R. Heinimäki, K. Hänninen, & P. Salomaa (2007). *Sähkön kysyntäjousto suurten loppuasiakasryhmien kannalta*. Energiategollisuus ry.
- Sen, Pankaj & Keun Lee (2014). Conservation voltage reduction technique: An application guideline for smarter grid. *IEEE Transactions on Industry Applications* 52: 3, 2122-2128.
- SFS 50160 (2010). *Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet*. Suomen standardisoimisliitto SFS-ry. 63 s.
- Sunderman, W. (2012). Conservation voltage reduction system modeling, measurement, and verification. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 7–10 May 2012, Orlando, USA.

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588.

Tilastokeskus (2019). Rakennukset ja kesämökit. [Verkkodokumentti]. [15.4.2019].  
ISSN 1798-677X. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/rakke/index.html>

Trimble (2019). Trimble NIS [Online]. [7.1.2019] Saatavissa: <https://utilities.trimble.fi/trimble-nis-sahkoverkoille.html>.

Trimble (2018). Trimble NIS 18.2. Käyttöohje.

Trimble (2017). Trimble NIS, Power System Analysis, Theory Guide For Finland.

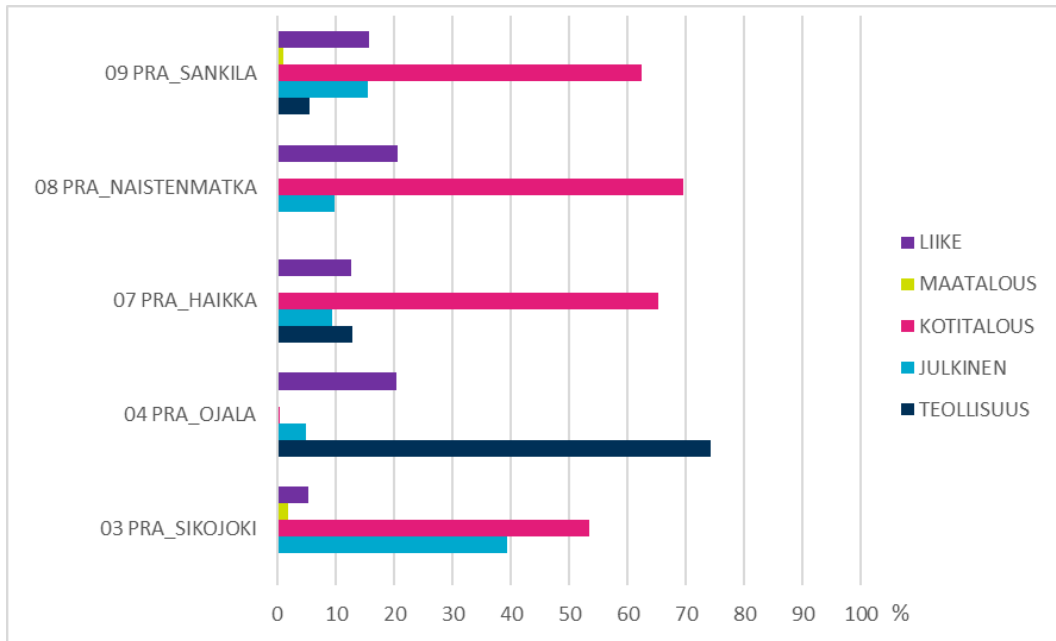
Työ- ja elinkeinoministeriö (2018). [Verkkodokumentti]. [30.10.2018] Saatavissa:  
<https://tem.fi/alyverkot>

Vuorinen, Tuomo (2019). Mittausasiantuntija, Elenia Palvelut Oy. Haastattelu, Tampere  
21.1.2019.

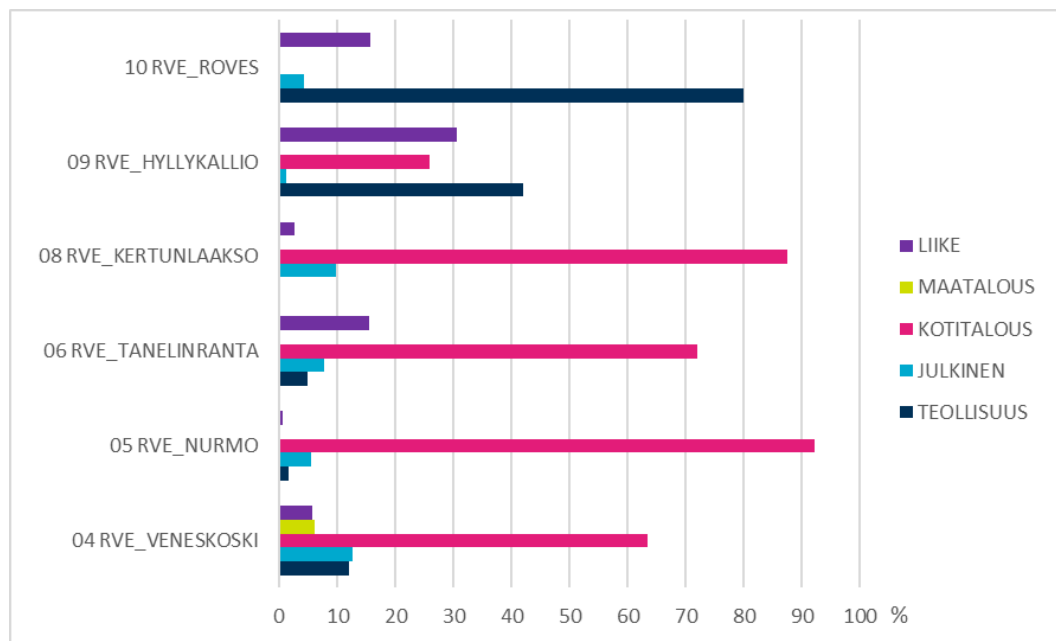
YLE (2013). Uusi laki suitsii sähkökatkon enimmäiskestoja. [Online]. [13.2.2019] Saata-  
vissa: <https://yle.fi/uutiset/3-6810328>

## LIITTEET

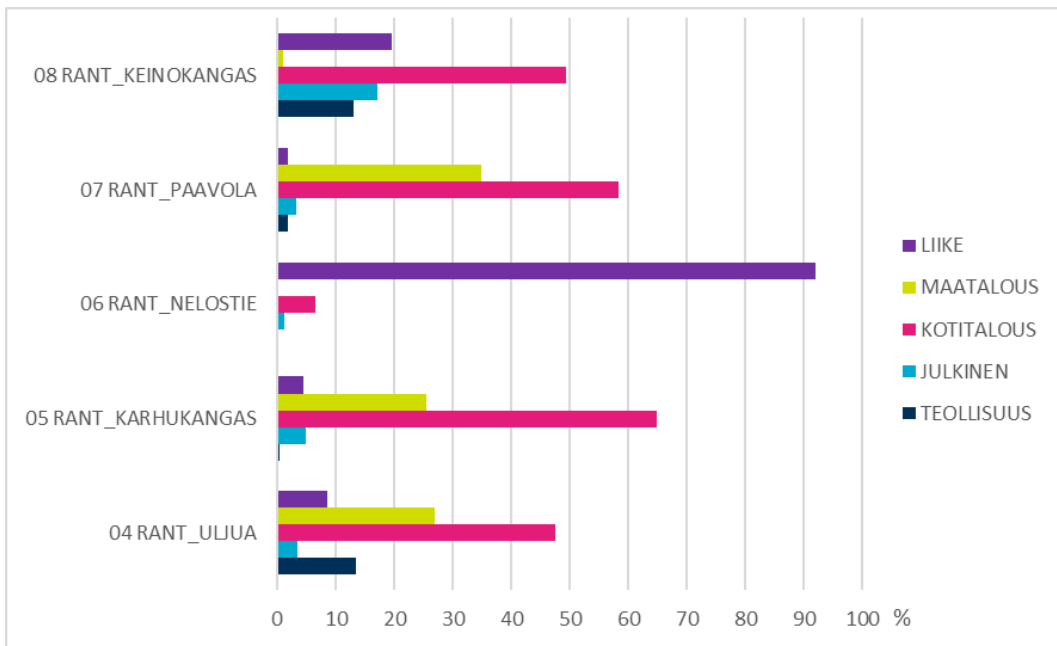
## LIITE 1. Kulutustyypit lähdeittäin



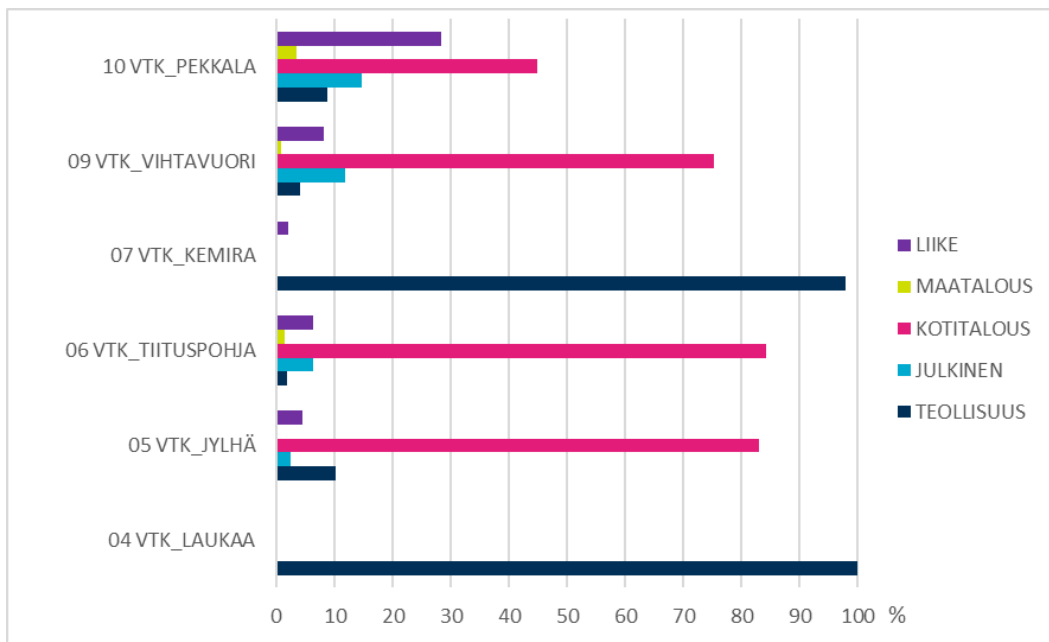
Kuva 23. Pirkkalan sähköaseman johtolähtöjen kulutustyyppien jakautuminen eri ryhmiin.



Kuva 24. Rovoksen sähköaseman johtolähtöjen kulutustyyppien jakautuminen eri ryhmiin.



Kuva 25. Rantsilan sähköaseman johtolähtöjen kulutustyyppien jakautuminen eri ryhmiin.



Kuva 26. Vihtakankaan sähköaseman johtolähtöjen kulutustyyppien jakautuminen eri ryhmiin.

LIITE 2. Jänniteensäädön tulokset sähköasemilta

Taulukko 9. Pirkkalan sähköaseman tulokset.

Lähtö	Keskiteho				Tehonmuutos 1 askelluksen osalta				Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta				CVR				Kaapelointiaste [%]			
	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät
J10 (PM)	13,2 MW	16,2 MW	14,8 MW	10,8 MW	0,25 MW	0,31 MW	0,27 MW	0,16 MW	1,85 %	1,88 %	1,86 %	1,49 %	1,2	1,44	1,23	1,01	85	85	85	87
J07	4,9 MW	6,34 MW	5,9 MW	3,8 MW	0,09 MW	0,14 MW	0,11 MW	0,06 MW	1,87 %	2,11 %	1,78 %	1,54 %	1,21	1,66	1,17	1,04	97	97	97	97
J04	3,4 MW	3,6 MW	3,6 MW	2,9 MW	0,08 MW	0,09 MW	0,07 MW	0,04 MW	2,35 %	3,26 %	1,93 %	1,33 %	1,53	2,44	1,27	0,90	60	60	60	60
J08	2,3 MW	2,8 MW	2,5 MW	1,9 MW	0,04 MW	0,04 MW	0,05 MW	0,03 MW	1,80 %	1,53 %	1,90 %	1,57 %	1,15	1,21	1,26	1,05	90	90	90	90
J09	1,5 MW	1,9 MW	1,7 MW	1,2 MW	0,03 MW	0,03 MW	0,03 MW	0,02 MW	2,10 %	1,39 %	1,86 %	1,41 %	1,38	0,99	1,22	0,95	83	83	83	83
J03	1,1 MW	1,3 MW	1,2 MW	1,1 MW	0,02 MW	0,03 MW	0,02 MW	0,01 MW	1,61 %	2,46 %	1,49 %	0,86 %	1,04	1,76	0,97	0,59	77	77	77	86
J10Q (PMQ)	0,5 MVar	0,8 MVar	0,5 MVar	-0,5 MVar	0,12 MVar	0,16 MVar	0,12 MVar	0,07 MVar	25,92 %	20,53 %	31,44 %	14,01 %	16,52	15,03	20,5	9,34	85	85	85	87



Taulukko 10. Rantsilan sähköaseman tulokset.

Lähtö	Keskiteho				Tehonmuutos 1 askelluksen osalta				Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta				CVR				Kaapelointiaste [%]				
	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	
Kausi																					
J03 (PM)	2,4 MW	3 MW	2,7 MW	1,7 MW	0,05 MW	0,07 MW	0,06 MW	0,03 MW	2,22 %	2,26 %	2,28 %	1,79 %	1,46	1,52	1,52	1,16	37	37	41	41	
J08	0,9 MW	1,2 MW	1,1 MW	0,7 MW	0,02 MW	0,03 MW	0,02 MW	0,01 MW	2,22 %	2,12 %	2,28 %	1,36 %	1,46	1,42	1,51	0,89	81	81	81	81	
J04	0,7 MW	0,8 MW	0,7 MW	0,5 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,01 MW	0,01 MW	2,27 %	2,33 %	1,97 %	2,00 %	1,49	1,56	1,32	1,30	74	74	75	75	
J07	0,4 MW	0,6 MW	0,5 MW	0,3 MW	0,01 MW	0,01 MW	0,01 MW	0,01 MW	2,32 %	1,37 %	2,32 %	2,03 %	1,55	0,9	1,55	1,32	5	5	3	3	
J05	0,3 MW	0,3 MW	0,3 MW	0,2 MW	0,0 MW	0,0 MW	0,0 MW	0,0 MW	1,59 %	1,38 %	1,78 %	1,75 %	1,06	0,94	1,23	1,12	0	0	0	0	
J03Q (PMQ)	-1,2 MVar	-1,2 MVar	-1,2 MVar	-1,3 MVar	-0,01 MVar	0,0 MVar	0,0 MVar	-0,02 MVar	-0,72 %	-0,10 %	-0,28 %	-1,26 %	-0,49	-0,05	-0,18	-0,82	37	37	41	41	

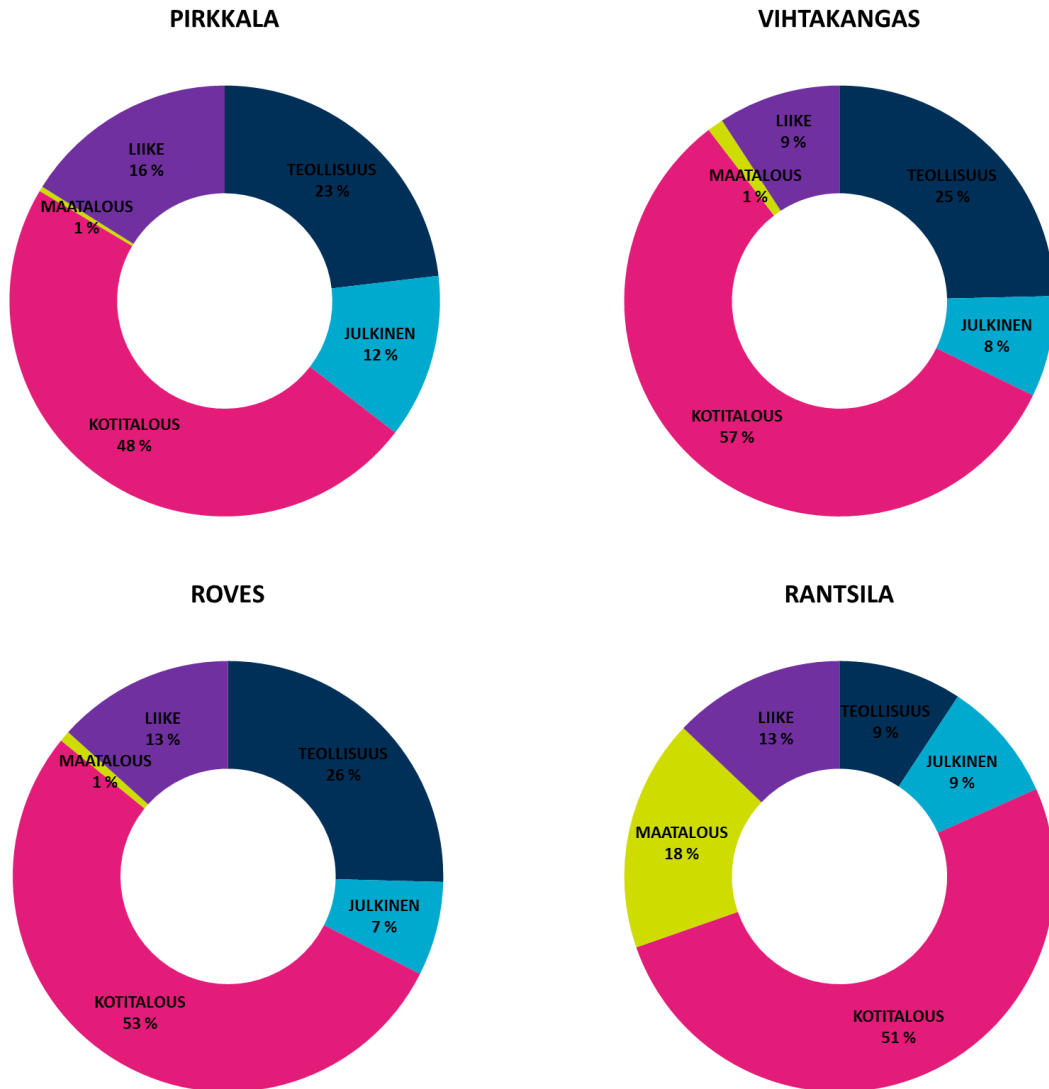
Taulukko 11. Roveksen sähköaseman tulokset.

Lähtö	Keskitihe				Tehonmuutos 1 askelluksen osalta				Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta				CVR				Kaapelointiaste [%]				
	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	
Kausi																					
J07 (PM)	6,9 MW	8,7 MW	8,8 MW	5,7 MW	0,14 MW	0,20 MW	0,16 MW	0,10 MW	2,07 %	2,34 %	1,81 %	1,70 %	1,4	1,63	1,21	1,16	61	61	64	67	
J09	3,4 MW	3,9 MW	4,0 MW	2,6 MW	0,07 MW	0,08 MW	0,08 MW	0,05 MW	2,13 %	2,11 %	1,88 %	1,93 %	1,43	1,47	1,25	1,32	74	74	80	86	
J06	1,3 MW	1,9 MW	1,8 MW	1,2 MW	0,03 MW	0,04 MW	0,04 MW	0,02 MW	2,18 %	2,12 %	2,00 %	1,90 %	1,48	1,48	1,33	1,3	50	50	61	61	
J04	1,1 MW	1,3 MW	1,4 MW	0,7 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,01 MW	1,82 %	2,20 %	1,72 %	1,67 %	1,23	1,54	1,15	1,14	44	44	46	46	
J10	0,8 MW	0,8 MW	0,7 MW	0,7 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,01 MW	0,01 MW	1,93 %	2,47 %	0,81 %	1,05 %	1,32	1,72	0,55	0,72	100	100	100	100	
J05	0,3 MW	0,9 MW	0,9 MW	0,5 MW	0,00 MW	0,03 MW	0,02 MW	0,01 MW	1,59 %	3,25 %	1,94 %	1,27 %	1,06	2,26	1,3	0,87	100	100	72	100	
J07Q (PMQ)	-1 MVar	-1,1 MVar	-1,1 MVar	-1,2 MVar	0,04 MVar	0,03 MVar	0,03 MVar	0,02 MVar	3,67 %	2,57 %	3,18 %	1,74 %	2,47	1,79	2,11	1,18	61	61	64	67	

Taulukko 12. Vihtakankaan sähköaseman tulokset.

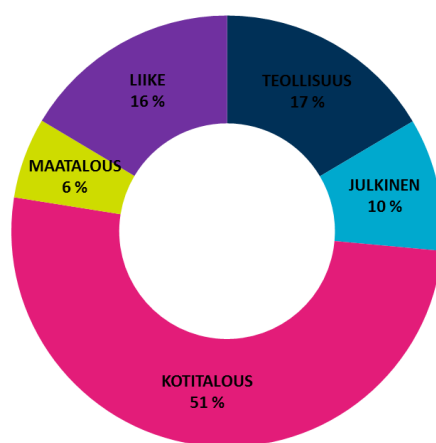
Lähtö	Keskitihe				Tehonmuutos 1 askelluksen osalta				Prosentuaalinen tehonmuutos 1 askelluksen osalta				CVR				Kaapelointiaste [%]			
	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät	Syksy	Pakka- nen	Talvi	Kevät
J08 (PM)	7,6 MW	9 MW	8,8 MW	7,2 MW	0,12 MW	0,13 MW	0,14 MW	0,10 MW	1,59 %	1,41 %	1,56 %	1,40 %	1,06	0,99	1,04	0,97	57	57	57	53
J07	3,4 MW	3,3 MW	3,6 MW	3,2 MW	0,04 MW	0,01 MW	0,05 MW	0,05 MW	1,21 %	0,16 %	1,25 %	1,53 %	0,8	0,14	0,83	1,06	65	65	65	65
J06	2,3 MW	3,1 MW	2,9 MW	1,7 MW	0,04 MW	0,07 MW	0,06 MW	0,02 MW	1,80 %	2,14 %	2,00 %	1,19 %	1,22	1,49	1,32	0,80	100	100	100	100
J10	0,9 MW	1,2 MW	1,2 MW	1,6 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,02 MW	0,02 MW	2,49 %	1,79 %	1,84 %	1,17 %	1,69	1,24	1,22	0,80	32	32	33	31
J09	0,8 MW	1,1 MW	0,9 MW	0,6 MW	0,01 MW	0,02 MW	0,01 MW	0,01 MW	1,71 %	1,84 %	1,59 %	1,46 %	1,15	1,26	1,06	1,02	100	100	100	100
J05	0,2 MW	0,2 MW	0,2 MW	0,1 MW	0,00 MW	0,00 MW	0,01 MW	0,01 MW	3,34 %	1,74 %	2,60 %	3,61 %	2,23	1,2	1,74	2,47	21	21	21	21
J08Q (PMQ)	-0,5 MVar	-0,6 MVar	-0,5 MVar	-0,8 MVar	0,03 MVar	0,02 MVar	0,04 MVar	0,03 MVar	6,69 %	5,07 %	9,48 %	3,93 %	4,58	3,52	6,28	2,66	57	57	57	53

## LIITE 3. Kulutustyyppien jakautuminen



Kuva 27. Kulutustyyppien jakautuminen testattavilla sähköasemilla.

## ELENIA



Kuva 28. Kulutustyyppien jakautuminen Elenia verkkoalueella.