Saana Grün

Teollisuuskiinteistöjen kulutusjouston potentiaali reservimarkkinoilla

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Diplomityö
Energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Saana Grün
Diplomityön nimi: Teollisuuskiinteistöjen kulutusjouston potentiaali reservimarkkinoilla
Tutkinto: Diplomi-insinööri
Oppiaine: Energiatekniikka
Työn valvoja: Anne Mäkiranta
Työn ohjaajat: Birgitta Martinkauppi & Juuso Kultti
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 84

TIIVISTELMÄ:

Uusiutuvien energian tuotantomuotojen kasvaneen tuotantokapasiteetin seurauksena sähköverkon tehotasapainon ylläpitäminen on koko ajan haastavampaa. Tehotasapainon ylläpitämiseksi kehitetyillä kulutusjoustolla ja reservimarkkinoilla sähköverkon taajuus saadaan pidettyä hallinnassa. Tarjoamalla kulutusjouston kapasiteettia reservimarkkinoille erilaiset toimijat voivat ansaita taloudellista hyötyä.

Kulutusjouston toteuttamista ja tuottopotentiaalia reservimarkkinoilla erilaisilla laitteilla on tutkittu aiemmin. Tämän vuoksi tutkimuksen keskeisimpänä tavoitteena on tutkia kiinteistöjen taloteknisten järjestelmien potentiaalia. Tutkimusmenetelmänä käytetään kvantitatiivista tutkimusta. Tutkimusaineistona käytetään kohdekiinteistön kulutusdataa ja aiempia taloteknisiä suunnitelmia. Aineisto kerätään sähköisistä järjestelmistä ja analysoidaan tilastollisten menetelmien avulla.

Tutkimustyön tärkeimpänä tuloksena todettiin, että nykyisellä kiinteistön talotekniikalla ei ole merkittävää tuottopotentiaalia reservimarkkinoilla. Kuitenkin tekemällä yksittäisiä lisäyksiä järjestelmiin markkinoille osallistuminen on mahdollista. Johtopäätöksenä tutkimuksesta voidaan todeta, että tuottopotentiaalien analysoinnin tuloksiin voidaan vaikuttaa sekä myönteisesti että kielteisesti. Tulevaisuudessa olisi kannattavaa keskittyä yhdenmukaistamaan tuottopotentiaalien analyysia.

AVAINSANAT: Kulutusjousto, reservimarkkinat, talotekniikka, energiavarastot, sähkökattilat

UNIVERSITY OF VAASA
School of Technology and Innovations
Author: Saana Grün
Title of the thesis: Industrial building's potential of demand side flexibility in reserve markets
Degree: Master of Science
Degree Programme: Energy Engineering
Supervisor: Anne Mäkiranta
Instructors: Birgitta Martinkauppi & Juuso Kultti
Year: 2025 **Pages:** 84

ABSTRACT:

The increasing production capacity of renewable energy sources has made maintaining the power balance of the electricity grid increasingly challenging. To maintain power balance, demand side flexibility and reserve markets have been developed to stabilize the grid frequency. By offering demand side flexibility capacity to the reserve markets, various operators can gain financial benefits.

The implementation and potential for profit generation of demand side flexibility in reserve markets by using different equipment has been studied previously. Therefore, the main objective of the research is to examine the potential of building services engineering systems in this context. The research adopts a quantitative research approach. The research data consists of the subject building's energy consumption data and existing building services engineering design documentations. The data is collected from electronic systems and analyzed by using statistical methods.

The main result of the study indicates that the current building services engineering systems have limited potential for profit generation in the reserve markets. However, with certain additions to the systems, participation in the reserve markets becomes feasible. As a conclusion of the study can be noted, that analysis of potential for profit generation can be influenced both positively and negatively. In the future it would be reasonable to focus on uniting analysis of potential for profit generation.

KEYWORDS: Demand side flexibility, reserve markets, building services engineering, energy storage systems, electric boilers

Alkusanat

Tämä diplomityö on ollut uusi ja kiinnostava tutkimustilaisuus, mutta erityisesti koko vuoden mittainen oppimisprosessi. Tutkimuksen edetessä osaamiseni on kehittynyt huomattavasti, jonka vuoksi näin työn lopulla tuntuu jopa erikoiselta miettiä niitä lähtökohtia, joista aloitin. Energiatekniikka, kuten muutkin insinöörialat, muuttuvat ja kehittyvät jatkuvasti, eli tämän lopputyönkin jälkeen on kuitenkin suunta taas eteenpäin kohti uutta opittavaa.

Kiitän Granlundia tämän diplomityön mahdollistamisesta ja työkavereitani Pohjanmaan energiaosastolla, jotka olette kannustaneet koko vuoden jaksamaan ja jatkamaan tutkimuksen parissa.

Kiitän esimiestäni, joka näki minussa potentiaalia jo muutama vuosi taaksepäin yhteistyömme alkaessa ja tarjosi mahdollisuutta kehittyä alalla, niin että olin valmis tarttumaan tähän haasteeseen.

Erityisesti kiitän diplomityöni ohjaajaa Granlundilta kaikista pitkistä palavereista tutkimukseen liittyen, hyvästä ja rakentavasta palautteesta sekä läsnä olemisesta, helposta tavoitettavuudesta ja pitkäjänteisyydestä ohjatessa ja auttaessa tutkimustyön kanssa.

Vaasan yliopistoa kiitän diplomi-insinöörin tutkinnon mahdollistamisesta, asiantuntevasta opetuksesta ja administratiivisesta tuesta. Tutkinnon suorittamisen aikana akateeminen ajatteluni on vahvistunut, tutkimustaitoni kehittyneet ja osaamiseni täysin uusien asioiden parissa karttunut.

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat 4

Lyhenteet 7

1 Johdanto 8

2 Rakennusten energiatehokkuus osana kulutusjoustoa 11

2.1 Talotekniikka ja kiinteistöjen sähköenergian kulutus 11

2.2 Mitä on kulutusjousto ja mihin sitä tarvitaan 15

2.3 Rakennusten energiatehokkuus ja kulutusjoustomallit 20

2.3.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät 20

2.3.2 Kulutusjoustomallit 23

2.3.3 Implisiittinen ja eksplisiittinen kulutusjousto 24

3 Sähköverkosto ja -markkinat 27

3.1 Sähköverkoston rakenne ja toiminta 28

3.2 Sähkömarkkinat 30

3.3 Reservimarkkinat 32

3.3.1 Taajuusohjattu käyttöreservi, FCR-N 37

3.3.2 Taajuusohjattu häiriöreservi, FCR-D 38

3.3.3 Nopea taajuusreservi, FFR 39

3.3.4 Automaattinen taajuuden palautusreservi, aFRR 39

3.3.5 Manuaalinen taajuuden palautusreservi, mFRR 40

4 Kiinteistöjen osallistuminen reservimarkkinoille 42

4.1 Mitä reservimarkkinoille osallistuminen vaatii 42

4.2 Teknisiä vaihtoehtoja reservimarkkinoille osallistumiseen 45

4.2.1 Virtuaalivoimalat eli aggregaattorit 45

4.2.2 Energiavarastot 48

4.2.3 Sähkökattilat 49
4.3 Reservimarkkinoilta saatava taloudellinen hyöty 51
5 Case-kohde 58
5.1 Tutkimuksen lähtökohdat 58
5.1.1 Aineisto ja tutkimusmenetelmät 59
5.1.2 Tutkimuksen valmistelu 60
5.2 Kiinteistön talotekniset järjestelmät 61
6 Tulokset 63
6.1 Järjestelmien joustopotentiaalit 63
6.2 Reservimarkkinoiden soveltuvuus 68
6.3 Investointimahdollisuuksia 72
7 Pohdinta ja johtopäätökset 76
7.1 Pohdinta 76
7.2 Johtopäätökset 78
8 Yhteenveto 79
Lähteet 82

Lyhenteet

aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve, automaattinen taajuuden palautusreservi
BESS	Battery Energy Storage System, akkuenergian varastointijärjestelmä
FCR	Frequency Containment Reserve, taajuusohjattu reservi
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
FFR	Fast Frequency Reserve, nopea taajuusreservi
FRR	Frequency Restoration Reserve, taajuuden palautusreservi
LTO	lämmöntalteenotto
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve, manuaalinen taajuuden palautusreservi
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio, kausittainen energiatehokkuussuhde
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön virtalähde
V2G	Vehicle-To-Grid, ajoneuvosta verkkoon -teknologia
VJK	vedenjäähdytyskone

1 Johdanto

Sähköenergian tuotannon rakenteessa ollaan merkittävien muutosten äärellä, kun ympäristöpolitiikka kasvattaa jatkuvasti tarvetta nostaa uusiutuvan energian osuutta kokonaistuotannosta. Uusiutuville energian muodoille on tyypillistä tuotantomäärien suuri ajallinen vaihtelevuus, jonka vuoksi tuotanto on hankala ajoittaa kulutuksen mukaan. Merkittävistä ajallisista energiantuotannon vaihteluista aiheutuu ylimääräistä kuormitusta, sekä häiriöitä sähköverkon toiminnassa. Uusiutuvat energianmuodot eivät myöskään tuota inertiaa, jolloin sähköverkko on entistä alttiimpi taajuuden muutokselle. Sähköenergian tuotanto on jo aiemmin mukautunut kulutuksen voimakkaaseen ajalliseen vaihteluun markkinoilla. Säädeltävän tuotantokapasiteetin osuuden koko ajan vähentyessä on kehitettävä uusia joustoratkaisuja, kuten esimerkiksi kulutusjousto.

Kulutusjouston toteuttamiseen on useampia erilaisia vaihtoehtoja. Keskeisenä kaikissa toteutustavoissa on tasapainottaa sähköverkon taajuutta tehollisella kapasiteetilla. Kulutusjoustoa varten on kehitetty erillisiä järjestelmiä ja laitteita, kuten aggregointi ja energiavarastot. Aiempien tutkimuksien perusteella ei kuitenkaan selviä mikä kiinteistöjen ja talotekniikan potentiaali kulutusjoustossa on. Kulutusjouston potentiaalia voidaan arvioida ja vertailla reservimarkkinoiden avulla. Reservimarkkinoilla maksetaan kulutusjouston kapasiteetin varalla pitämisestä sekä tarvittaessa reservin aktivoituessa kulutetusta energiasta.

Tutkimuksen kannalta oleelliseen kirjallisuuteen kuuluu lähtökohtaisesti alan eri asiantuntijajärjestöjen, kuten Motivan, VTT:n ja Energiateollisuuden aineistot kulutusjoustosta. Aiemmista tieteellisistä tutkimuksista voidaan mainita kulutusjoustomalleja ja niiden toteutettavuutta käsittelevät tutkimukset. Suomessa reservimarkkinoista vastaavan Fingridin aineistot ovat myös tutkimuksen kannalta merkittäviä.

Tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena on selvittää, onko kiinteistöjen talotekniikalla potentiaalia osallistua reservimarkkinoille kulutusjoustoa toteuttaen. Kirjallisuuden perusteella reservimarkkinoille vaaditaan mittavaa tehollista kapasiteettia, jonka vuoksi tutkimuksen case-kohteena on suuri teollisuuskiinteistö. Päätavoitteen lisäksi tarkasteltiin erilaisia vaihtoehtoja ja lisäyksiä talotekniikan ohella reservimarkkinoille osallistumiseksi. Näiden avulla pystytään arvioimaan reservimarkkinoiden tuottopotentiaalia muistakin näkökulmista sekä ymmärtämään niiden vaatimuksia tarkemmin.

Tutkimuksen sisältöä rajattaessa ensimmäisenä mainittakoon tekniikan tarkastelun keskittyvän kiinteistöön. Sähköverkon rakenne ja toiminta käydään läpi karkeasti yleisellä tasolla. Tutkimuskohteena toimivan teollisuuskiinteistön tekniikan osalta prosessitekniikka rajataan kokonaan tutkimuksesta pois. Prosessitekniikan sisällyttäminen rajoittaisi kiinteistön käyttötarkoituksenmukaista toimintaa. Myös tuotantotaloudelliset syyt vaikuttavat asiaan. Tutkittava tekniikka rajautuu kokonaisuutenaan kiinteistön talotekniikkaan, jonka osalta rajoittavia tekijöitä ovat toimivuuden ja olosuhteiden kannalta kriittiset tilat. Kriittisiä tiloja ovat esimerkiksi sähkötekniset tilat, prosessitilat ja räjähdysvaaralliset tilat.

Kulutusjouston erilaisista toteutusvaihtoehdoista tarkastellaan erityisesti energiavarastoja ja sähkökattiloita. Energiavarastojen osalta keskitytään vain sähköenergiavarastoihin eli akkuihin. Itse akkuteknologiaa ei tutkita, vaan akkujen toiminnallisuutta kulutusjoustossa. Energiavarastojen ja sähkökattiloiden tarkempaa kytkeytymistä olemassa olevaan talotekniikkaan ei tarkastella tutkimuksessa. Aggregointia kulutusjouston toteutuksessa tarkastellaan kevyesti. Tutkimuksen teollisuuskiinteistö olisi mahdollista aggregoida muun kiinteistökannan kanssa. Resurssien takia kiinteistökannan aggregoinnin potentiaalin tarkempi tutkimus rajataan pois.

Reservimarkkinat ovat osa sähkömarkkinoiden kokonaisuutta, joka itsessään on laaja aihealue. Tutkimuksessa tarkastellaan yleisellä tasolla lyhyesti sähkömarkkinoiden

rakennetta, jotta saadaan käsitys reservimarkkinoiden markkinapaikasta. Reservimarkkinoista tutkitaan tarkemmin eri reservituotteiden toiminnallisuuksia, käyttötarkoitukset sekä vaatimukset osallistumista varten. Myös reservituotteiden tuottopotentiaaleja analysoidaan. Tuottopotentiaalin tarkastelussa ei huomioida energiamaksuja eikä sanktioita. Markkinoiden kehitystä, tulevaisuutta tai ennustettavuutta ei tarkastella.

2 Rakennusten energiatehokkuus osana kulutusjoustoa

Tavoite hiilineutraaliudesta ja ilmastonmuutoksen hillinnästä vaikuttaa nykypäivänä merkittävästi kaikkiin energiaan liittyviin osa-alueisiin. Energiatehokkuus ja ympäristöasiat puhututtavat lähes jokaisen asian yhteydessä. Yleisimpiä pohdinnan aiheita ovat mistä kaikesta voidaan säästää, ja kuinka luonnonvaroja voitaisiin käyttää entistä tehokkaammin.

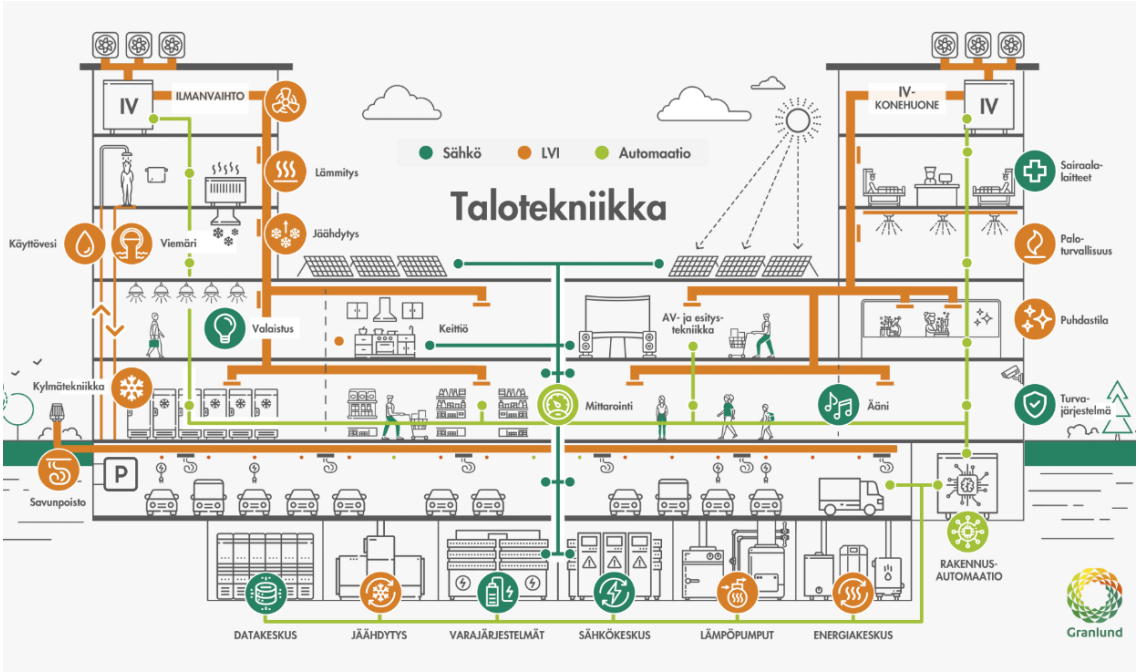
Merkittävimpiä energiaa kuluttavia kohteita ovat itse rakennukset niiden jokaisessa käyttötarkoitusluokassaan. Rakennusten energiatehokkuutta tarkasteltaessa, keskeisimmässä osassa on talotekniikka, sekä taloteknisten järjestelmien sähköenergian kulutus. Oikein suunnitellulla ja optimoidulla talotekniikalla kiinteistöjen energiatehokkuutta voidaankin parantaa entisestään.

Energiankulutuksen lisäksi tärkeässä asemassa on energiantuotanto. VTT (2023, s. 3–5) esittää tutkimuksessaan, kuinka fossiilisten energianlähteiden käytön jatkuvasti vähentyessä, sääriippuvaiset energianlähteet kasvattavat koko ajan osuuttaan. Sääriippuvaisten energian tuotantomuotojen rinnalle tarvitaan siis energiankäytön hetkellistä joustoa kustannusten ja saatavuuden tasapainottamiseksi. Energiankäytön hetkellistä joustoa kutsutaan kulutusjoustoksi.

2.1 Talotekniikka ja kiinteistöjen sähköenergian kulutus

Kiinteistö- ja rakennusalalla taloteknisten ratkaisujen merkitys kasvaa koko ajan. Alalla kohdataan useita energia-asioihin, sisäilmaolosuhteisiin, tuottavuuteen ja vastuullisuuteen liittyviä haasteita, joita voidaan ratkaista talotekniikan avulla. Erityisesti talotekniikka vaikuttaa rakennusten tekniseen toimivuuteen ja energiatehokkuuteen, mutta sillä on oma osansa myös vastuullisessa rakentamisessa, sekä sisäympäristön viihtyvyydessä. Hyvän sisäilmaston ja viihtyvyyden perustana on tilojen hallitut olosuhteet, kuten

lämpötila, ilman liikkeet, kosteus, hiilidioksidipitoisuus, valaistus ja äänentasot. Granlund Oy:n (2024a) sivuilta lainatussa kuvassa 1 on esitetty mitä kaikkea kuuluu talotekniikkaan.



Kuva 1. Kiinteistön talotekniset järjestelmät (Granlund 2024a).

Talotekniikkaan kuuluvat LVI-, sähkö- ja automaatiojärjestelmät. Jokaisella järjestelmällä on talotekniikan toimivuuden kannalta tärkeä merkityksensä. Ilman jotain näistä kolmesta pääjärjestelmästä, talotekniikan toiminnallisuus on vajaata, tai jopa olematonta. Yhteiskunnan jatkuvasti sähköistyessä myös rakennusten energiankulutus kasvaa entisestään. Energiatehokkuuteen koko ajan enemmän vaikutettaessa, sähköenergian kulutuksen merkitys on alkanut korostumaan jopa rakennusten lämmityksessä. Nykyään sähköenergian tarve on suurempi myös kesäisin, erilaisten viilennysratkaisujen myötä. Kiinteistöjen sähkönkulutus riippuu hyvin paljon rakennuksessa käytetyistä teknisistä ratkaisuista, sekä rakennuksen käyttötarkoituksesta.

Ketomäki (2024, s. 86) kertoo sähköenergian käytöstä rakennuksessa, kuinka sitä voidaan käyttää lämmitykseen, jäähdytykseen, ilmanvaihtoon, valaistukseen, käyttöveden

lämmittämiseen, sekä erilaisten koneiden ja laitteiden toimintaan. Eroina järjestelmillä on, käyttävätkö ne suoraan sähköenergiaa, vai ns. välillisesti, kuten esimerkiksi lämpöpumput.

Järjestelmäkohtaisesti tarkasteltuna voidaan huomioida eri taloteknisissä järjestelmissä sähköenergiaa kuluttavat laitteet ja komponentit. Lämmitysjärjestelmien kannalta merkittävin sähköenergian kuluttaja on suora sähkölämmitys, kuten sähköpatterit, sähköinen lattialämmitys tai sähkövastuksella toimivat lämmityskattilat. Muita lämmityksessä käytettäviä, suoraan sähköenergiaa kuluttavia ratkaisuja ovat sähköllä toimivat puhallinkonvektorit ja oviverhokoneet. Erilaiset lämpöpumppuratkaisut ovat nykyään hyvin suosittuja korkeiden hyötysuhteidensa ansiosta, mutta toimiessaan nekin kuluttavat sähköä. Kuitenkin suoraan sähkölämmitykseen verrattuna lämpöpumppujen kulutus on hyvin vähäistä. Lämpöpumppujärjestelmissä sähköenergiaa kuluttavat mm. pumput ja puhaltimet sekä kompressori. Sähköttömänä lämmitysmuotona pidetään kaukolämpöä, vaikka tämäkin järjestelmä sisältää muutamia sähköenergiaa kuluttavia komponentteja, kuten pumput. Kaukolämmitysjärjestelmän sähköenergian kulutus on kuitenkin niin pientä, että järjestelmä on käytännössä sähkötön. Käyttövesijärjestelmiin pätee suhteellisen samat tekijät kuin lämmitysjärjestelmiin. Suoralla sähkövastuksella lämmitettäessä käyttövettä, sähköenergiaa kulutetaan eniten. Vastaavasti kaukolämmöllä lämmitettäessä sähköä käyttävät vain pumput ja toimilaitteet.

Ilmanvaihtojärjestelmien osalta sähköä kuluttavista laitteista voidaan ensimmäisenä mainita pientaloissa tai huoneistokohtaisessa ilmanvaihdossa käytettävät pakettikoneet. Suuremmat, modulaariset ilmanvaihtokoneet eivät ole yhtä suoraviivaisesti tarkasteltavissa, koska vain osa komponenteista kuluttaa sähköenergiaa. Sähköenergiaa kuluttavia komponentteja ovat puhaltimet, tietyn tyyppiset LTO-laitteet ja lämmityspatterit, sekä pumput. LTO-laitteista sähköä käyttävät regeneratiiviset laitteet, joissa sähkömoottori pyörittää lämmönsiirtokiekkoa. Nestekiertoiset LTO-laitteet käyttävät sähköä välillisesti, koska lämpö siirtyy nesteen välityksellä, mutta nestettä liikuttava pumppu kuluttaa

sähköenergiaa. Lämmityspatterit käyttävät myös suoraan tai välillisesti sähköä. Nestekiertoiset lämmityspatterit käyttävät sähköenergiaa välillisesti pumpulla, ja useimmiten jälkilämmityspattereina ilmanvaihtokanavissa käytettävät, sähkövastuksella toimivat lämmityspatterit, käyttävät suoraan sähköenergiaa.

Kylmäteknisistä laitteista ja jäähdytysjärjestelmistä, suurimpia sähkönkuluttajia ovat VJK:t sekä lämpöpumput. Näissä sähkönkulutus on välillistä, koska sähköä kuluttavat koneen sisäiset laitteet, kuten pumput, kompressorit ja lauhduttimet. Lisäksi myös osa kylmäjärjestelmien pääteosista kuluttaa sähköä luovuttaessaan kylmää tarvittavalle prosessille tai laitteelle. Hyvänä esimerkkinä voidaan mainita ilmalämpöpumput ja esimerkiksi kaupan kylmäkalusteet.

Sähköjärjestelmien osalta sähköä kuluttavista laitteista tärkeimpänä voidaan mainita rakennusten valaistus. Motivan (2024a) mukaan valaistukseen kuluu kaikesta Suomessa käytetystä sähköstä noin 10 %, mutta julkisten rakennusten sähkönkulutuksesta valaistukseen voi kulua viides- tai jopa kolmasosa. Valaistuksen energiankulutukseen vaikuttaa valaistuksen ohjaustekniikan lisäksi valaisimien sijoittelu, huonepintojen heijastavuus, valaisimien kuluminen, sekä luonnonvalon hyödynnettävyys.

Sähköjärjestelmissä valaistus kuluttaa sähköä, kuten myös sulanapito- ja UPS-järjestelmät (uninterruptible power supply). Tietoteknisten järjestelmien jakautuessa pienempiin yksittäisiin järjestelmiin ja laitteisiin, voidaan näiden laitteiden todeta kuluttavan sähköä toimiessaan. Sama koskee myös sähkölaitteita. Sähköjärjestelmien sähkönkulutuksessa erona on enemmänkin sähkön kulutuksen ajan hetki, ei niinkään se, onko sähkönkulutus suoraa vai epäsuoraa. Esimerkiksi varavoimakoneet kuluttavat sähköä vain aktivoituessaan, kuten myös turvajärjestelmiin kuuluvat savunpoistoluukut.

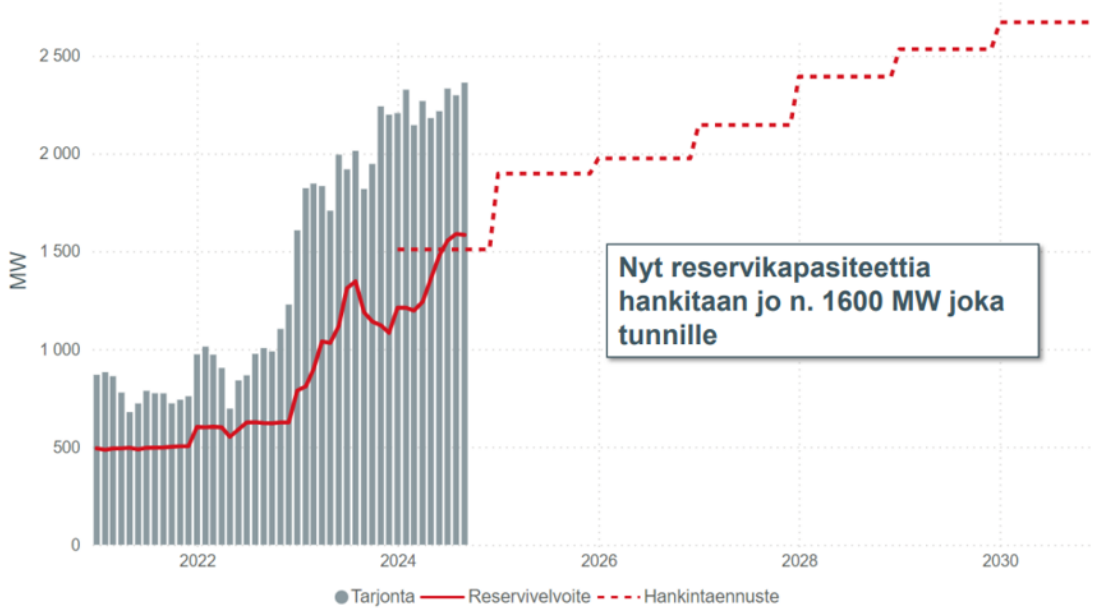
Myös automaatiojärjestelmiä voidaan tarkastella samasta näkökulmasta kuin sähköjärjestelmiä. Erona kuitenkin on, että automaatiojärjestelmät ovat jatkuvasti käytössä ja

näin ollen kuluttavat koko ajan sähköenergiaa. Automaatiojärjestelmien kaikki komponentit kuluttavat sähköä mitatessaan sekä ohjatessaan muita rakennuksen järjestelmiä. Sähkön kulutus on kuitenkin niin pientä, ettei sillä ole juuri merkitystä.

2.2 Mitä on kulutusjousto ja mihin sitä tarvitaan

Kulutusjoustolla tarkoitetaan sähkön käytön muuttamista sähköenergian hinnan mukaisesti (Fingrid, 2024c). Hyvärinen (2024, s. 208) kertoo, kuinka kulutusjoustoa voidaan tarkastella kuluttajan näkökulmasta säästötoimenpiteenä, tai vastaavasti energiaverkostojen näkökulmasta katsottuna, näkyvänä muutoksena kulutuksessa. Käytännössä tarkastellaan siis rakennuksen tai yksittäisen kuluttajan reagointikykyä energianhinnan muutokseen tietyllä ajanjaksolla. Reagointi voi olla manuaalista, osittain tai jopa kokonaan automaattista. Tekniikan kehittyessä laitteet ja järjestelmät pystytään integroimaan niin, että kulutusjoustoa voidaan toteuttaa seuraamalla esimerkiksi reaaliajassa sähköenergian hintaa. Kulutusjoustosta voidaan käyttää myös termiä kysynnänjousto, joka on johdettu taloustieteestä ja korostaa enemmänkin energiantuotannon osuutta kulutusjoustossa.

Kulutusjousto käsitteenä on vielä jokseenkin uusi, mutta sen merkitys on ollut voimakkaasti noususuhdanteinen viimeisen parin vuoden aikana. Fingridin (2024a, Reservimarkkinat, Liitteet, Reservimarkkinakoulutus 2024, s. 26) koulutusmateriaalissa esitetyssä tilastossa vielä vuonna 2022 kulutusjoustosta hankittu kapasiteetti on ollut noin 500 MW. Vuoden 2024 lopulla kapasiteettia on hankittu jo noin 1 600 MW jokaiselle vuoden tunnille. Kuvassa 2 on esitetty kulutusjoustolla hankitun kapasiteetin kehitys viimeisen parin vuoden aikana, sekä ennuste hankintamäärästä tulevaisuudessa.



Kuva 2. Kulutusjouston kapasiteetin kehitys ja ennuste (Fingrid, 2024a, Reservimarkkinat, Liitteet, Reservimarkkinakoulutus 2024, s. 26).

Kuvassa 2 esitetyssä Fingridin (2024a, Reservimarkkinat, Liitteet, Reservimarkkinakoulutus 2024, s. 26) koulutusmateriaalin ennusteessa kulutusjoustosta saatavan kapasiteetin tarve tulisi kasvamaan vuoteen 2030 mennessä yli 2 500 MW:iin. Kulutusjoustosta hankittua kapasiteettia tarvitaan valmiuteen, säätämään äkillisesti muuttuvaa tehoa energiantuotannossa.

Energiateollisuuden (n.d. -a) mukaan merkittävät ajalliset vaihtelut energiantuotannon määrissä ovat ominaisia sääriippuvaisille energianlähteille. Ajalliset vaihtelut tuotannossa näkyvät siten, että sähköä joudutaan ostamaan ulkomailta silloin, kun ei tuule tai aurinko ei paista. Motivan (2024b) järjestämässä webinaarissa todettiin tuotannon ajallisen vaihtelun aiheuttavan haasteita ja ongelmia sähköverkon toiminnassa. Aikaisemmin sähkön tuotanto on mukautunut sähkön kulutukseen, mutta säädeltävän tuotannon osuuden vähentyessä on kehitettävä uusia joustoratkaisuja. Uusilla joustoratkaisuilla sähköverkon toimintaan pystytään vaikuttamaan enemmän, mutta tästä on myös sähkön kuluttajalle taloudellista hyötyä.

VTT (2023, s. 3) kertoo oppaassaan, kuinka sähköverkon toiminnan lisäksi, sähkön saatavuuden vaihtelu näkyy myös jatkuvasti vaihtelevassa sähkön hinnassa. Sähkön hinta vaihtelee tuotannon mukaan tunneittain, ja tulevaisuudessa jopa varttitasolla. Tuulisella säällä kun sähköä on saatavilla paljon, hinta on alhainen. Vastaavasti kun tuotantoa on vähän, hinnat ovat korkealla. Energiateollisuuden (n.d. -a) mukaan kehityksen suuntana on enenevissä määrin sähkön kulutuksen joustavuus tuotannon mukaan.

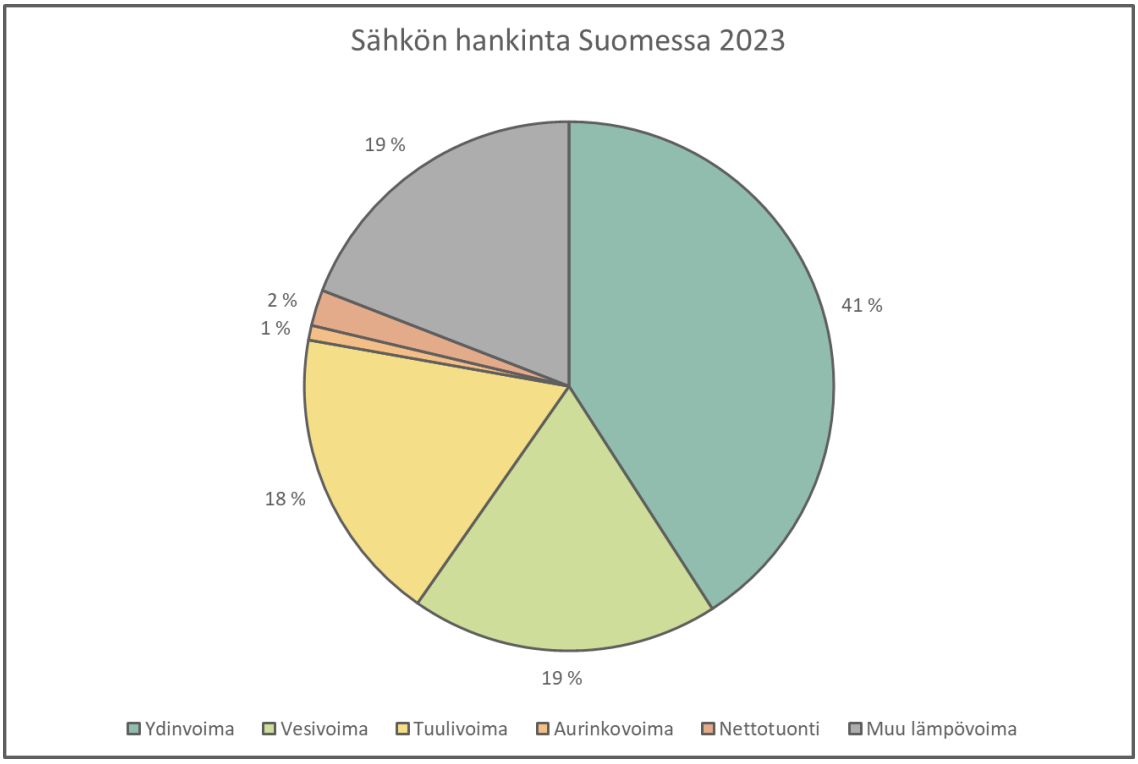
Sääriippuvaisilla energianlähteillä on siis suora yhteys sähkön tuotannon kapasiteetin kautta sähkön hintaan. Tästä hyvää esimerkkiä todistettiin alkuvuodesta 2024, kun sähkön hinnat vaihtelivat erityisen merkittävästi. Fingridin (2024b) sivuilta saatavasta datasta nähdään sähkön hinnan käyneen korkeimmillaan 5.1. klo 19–20. Tuolloin sähkön Suomen aluehinta vuorokausimarkkinoilla oli 1896 € / MWh. Helmikuussa korkein Suomen aluehinta vuorokausimarkkinoilla oli noin 250 € / MWh ja alhaisin hinta -2,5 € / MWh. Kuvassa 3 on esitetty helmikuussa 2024 toteutuneet sähkön tuotannon kapasiteetit Suomessa, sekä sähkön Suomen aluehinta vuorokausimarkkinoilla.

Kuva 3. 2024 helmikuussa toteutuneet sähkön tuotannon kapasiteetit ja sähkön hinta vuorokausimarkkinoilla (Fingrid, 2024b).

Kuvasta 3 nähdään, että sähkön tuotannon pohjana on ydinvoima. Tuotanto on hyvin vakaata, jonka vuoksi se luo hyvän perustan sähkön tuotannolle. Ydinvoimalla pyritään kattamaan mahdollisimman suuri osa sähkön kysynnästä. Toisena vakaana tuotantomuotona toimii teollisuuden ja kaukolämmön yhteistuotannot. Kuvasta 3 nähdään myös, kuinka epävakain tuotantomuoto on tuulivoima. Tuulettomina päivinä sähkön tuotantoa pystytään paikkaamaan lisäämällä vesivoiman ja muun tuotannon osuutta, jotka ovat nopeasti saatavilla ja helposti säädeltävissä. Kuvasta kuitenkin nähdään, ettei se ei aina riitä. Tällöin sähköenergiaa on ostettava Suomen rajojen ulkopuolelta. Myös aurinkovoima on sääriippuvaista ja epävakaata, mutta sen osuus Suomen sähkön tuotannossa on hyvin vähäistä. Aurinkovoiman osuus energian tuotannossa myös vaihtelee paljon

vuodenaikojen mukaan. Kuvassa 3 korkeimmalla oleva käyrä näyttää sähkön kulutuksen, tuotantomuotojen päällä kulkeva käyrä kuvastaa sähkön hintaa.

Tilastokeskuksen (2024) sivuilla on ilmoitettu, että vuonna 2023 ydinvoimalla tuotetulla sähköllä katettiin noin 40 % Suomen kokonaiskulutuksesta. Yhteistuotannolla tuotetun osuuden määrä sähkön kokonaiskulutuksesta oli noin 19 %. Sekä tuuli- että vesivoiman tuotannon osuudet olivat vuonna 2023 vajaa 20 %, ja aurinkovoiman tuotannon osuus noin 1 %. Ostetun sähkön osuus oli noin 2 %. Alapuolella kuviossa 1 on esitetty yhdessä kaikki eri Suomen sähkön tuotantomuotojen osuudet.



Kuvio 1. Sähkön hankinta Suomessa 2023 (Tilastokeskus, 2024).

Kulutusjouston tarve tulee korostumaan tulevaisuudessa, kun jo nykyään sähkön kokonaiskulutuksesta 20 % katetaan sääriippuvaisilla ja suhteellisen epävakailla tuotantomuodoilla. Kyseinen prosenttiosuus tulee vain kasvamaan tulevaisuudessa. VTT (2023) muistuttaa oppaassaan, kuinka suuret sähkön hinnan vaihtelut ovat seurausta

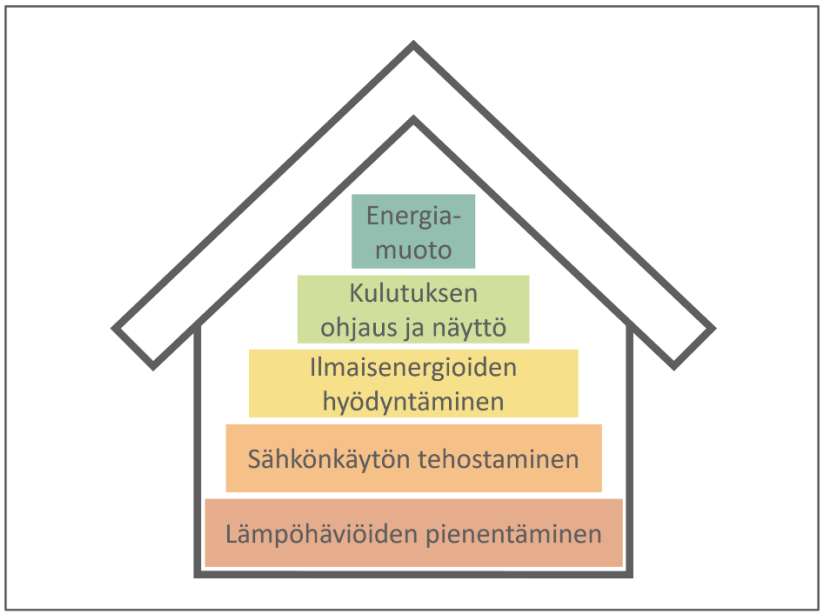
uusiutuvien energianlähteiden kasvavasta osuudesta kokonaistuotannossa, ja näin ollen todennäköisesti pysyvä ilmiö. Sähkön hinnan ollessa korkealla, kuluttajalle tarjoutuu mahdollisuus kustannussäästöihin kulutusjouston avulla. Merkittävässä roolissa kulutusjouston kannalta ovatkin suurien kiinteistöjen omistajat, sekä teollisuusyritykset. Tilastokeskuksen (2024) sivuilla on ilmoitettu teollisuuden ja rakentamisen osuudeksi sähkön kokonaiskulutuksesta Suomessa noin 43 % vuonna 2023. Palveluiden ja julkisen kulutuksen osuus oli 23,8 %. VTT:n (2023) mukaan on mahdollista saavuttaa mittavia ja pysyviä muutoksia sähkön hinnassa, kun nämä suuret toimijat saadaan mukaan kulutusjoustoon.

2.3 Rakennusten energiatehokkuus ja kulutusjoustomallit

Kuten Hyvärinen (2024, s. 208) toteaa, kulutusjoustoa voidaan tarkastella kuluttajan ja tuottajan näkökulmista. Kuluttajan näkökulmasta tarkasteltaessa puhutaan implisiittisestä kulutusjoustosta, ja tuottajan näkökulmasta tarkasteltaessa eksplisiittisestä kulutusjoustosta (VTT, 2023, s. 5). Sekä implisiittistä, että eksplisiittistä kulutusjoustoa toteutetaan neljällä erilaisella toimintamallilla, jotka taas hyödyntävät erilaisia energiatehokuuden parantamisen keinoja ja toimenpiteitä. Kulutusjouston toteuttamista ja kulutusjoustomalleja käsitellään ns. alhaalta ylöspäin, perehtyen ensin energiatehokkuuteen vaikuttaviin toimenpiteisiin, sitten kulutusjouston toteuttamismalleihin, ja lopuksi siihen, onko kulutusjoustoon osallistuva taho energiantuottajan vai -kuluttajan asemassa.

2.3.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Hyvärinen (2024, s. 206) kertoo, kuinka rakennuksen energiatehokkuus on yksi toimiva kokonaisuus, joka muodostuu erilaisista pienemmistä tekijöistä. Energiatehokkuuteen aletaan vaikuttamaan jo rakentamisvaiheessa. Energiatehokasta rakentamista voidaan kuvata Kioto-pyramidilla, joka esittää eri tekijöiden merkityksen rakennuksen energiatehokkuuden kannalta. Kioto-pyramidi on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Kioto-pyramidi (Hyvärinen, 2024, s. 206).

Hyvärisen (2024, s. 206) mukaan kaiken perustana avainasemassa on lämpöhäviöiden pienentäminen. Lämpöhäviöiden minimoimisella saadaan varmistettua, ettei energiaa kulu turhaan sisäilman olosuhteiden ylläpitämiseen. Pienet lämpöhäviöt saavutetaan riittävällä ulkovaipan lämmöneristyksellä ja tiiviydellä, ikkunoiden aurinkosuojauksella ja tehokkaalla lämmöntalteenotolla ilmanvaihdosta. Pyramidissa seuraavana olevilla portailla tehostetaan energian käyttöä. Energian käyttöä voidaan tehostaa hyödyntämällä ilmaisenergioita, energiatehokkailla laitteilla, laitteiden tarpeenmukaisella käytöllä, sekä kulutuksen seurannan avulla. Vasta pyramidin huipulla on valinta energian tuotantomuodosta.

Hyvärisen (2024, s. 206) kertoo, kuinka energiatehokkaassa rakentamisessa ratkaisevana tekijänä ovat yhteensopivat ja toimintavarmat järjestelmät arkkitehtuurin, rakenne- ja talotekniikan osalta. Vaikuttavia tekijöitä ovat arkkitehtisuunnittelun osalta rakennuksen sijainti, tilat, massoittelu, materiaalit ja joustavuus taloteknisiä järjestelmä suunnitelta-essa, sekä rakennetekniikassa rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset ominaisuuden ja ilmatiiviys. Talotekniikassa energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa rakentamisvaiheessa

laitevalinnoilla ja ammattitaitoisella suunnittelulla. Rakentamisvaiheessa kattavaan automaatioon investoimalla voidaan energiatehokkuuteen vaikuttaa vielä rakentamisen jälkeen, ja näin ollen päästä parempiin tuloksiin energian säästötoimenpiteissä. Esimerkkinä voidaan mainita valaistuksen ohjaus tai tilojen olosuhteiden tarpeenmukainen hallinta.

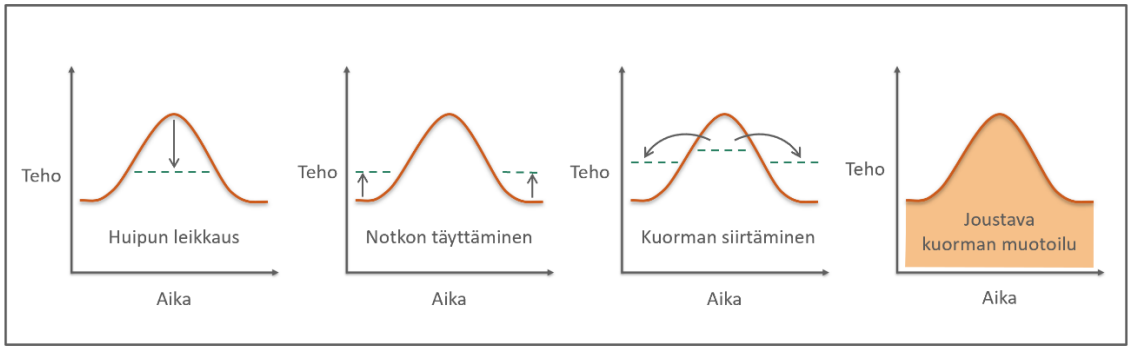
Kuvion 2 Kioto-pyramidia tarkasteltaessa voidaan todeta talotekniikan ja automaation merkityksen painottuvan lähes kaikkiin pyramidin osiin, lukuun ottamatta alinta porrasta, ja kattaen näin lähes koko pyramidin. Huipulla olevaan energiamuodon valintaan ei kuitenkaan voida vaikuttaa oikeastaan muulloin kuin rakentamis- ja saneerausvaiheessa. Liikuttaessa alhaalta ylöspäin, ensimmäisenä pyritään vaikuttamaan kulutuksen vähentämiseen, toisena sen optimointiin ja viimeisenä kulutuksen siirtämiseen (Hyvärinen, 2024, s. 206–207).

Hyvärisen (2024, s. 206–207) mukaan kolmesta edellä mainitusta kulutuksen vähentäminen on näistä yksinkertaisin ja suoraviivaisin toimenpide. Yksinkertaisinta on rajoittaa laitteiden ja järjestelmien sähkönkulutusta. Myös rakennusautomaation läpi käymisellä ja asetusarvojen säätämisellä saadaan järjestelmät toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Kulutuksen optimointi on jokseenkin haastavampaa, koska tällöin sähköenergian kulutus pyritään saamaan minimiin. Optimointia voidaan tehdä muun muassa rakennusautomaation aikaohjelmilla, jolloin eri prosessien alkamista voidaan aikaistaa tai viivästyttää.

Optimoinnissa tulee kuitenkin huomioida tilojen olosuhteiden muutokset, ja lähtökohtana tuleekin aina olla terveelliset sisäilmaolosuhteet, ei energian säästäminen. Hyvärinen (2024, s. 208) kertoo myös, kuinka kulutusta voidaan siirtää edullisempaan ajankohtaan, kuten esimerkiksi halvempaan sähkönhintaan tai vaikka huippukulutuksen piikkien hallitsemiseen. Tärkeässä roolissa kulutusta siirrettäessä ovat erilaiset energian varastointiratkaisut, kuten akut ja varaajat.

2.3.2 Kulutusjoustomallit

Kulutuksen vähentäminen, optimointi ja siirtäminen luovat pohjan kulutusjouston toteuttamisen menetelmille. Kulutusjouston toteuttaminen voidaan jakaa neljään erilaiseen toimintamalliin. Lampropouloksen (2014, s. 40) mukaan tavoitteena kaikissa malleissa on muuttaa sähkönkulutuksen ajoitusta. Kulutuksen ajoitusta muutetaan tasaamalla huippukulutuksen piikkejä vastaamaan sähköverkon tasapainotilaa. Kulutusjoustomallit on esitetty kuviossa 3.



Kuvio 3. Kulutusjoustomallit (Lampropoulos, 2014, s. 40).

Huipun leikkauksen toimintamallin tarkoituksena on laskea korkeimpia sähkön kulutushuippuja, jotta tuotantoa ei tarvitsisi lisätä (Panda ja muut, 2022, s. 3735). Toimintamallissa sovelletaan suoraan kulutuksen vähentämistä, joka todettiin kolmesta toimenpiteestä yksinkertaisimmaksi. Myös kulutuksen optimointi on osa huipun leikkauksen toimintamallia, kun sähköenergian käyttö pyritään minimoimaan. Notkon täyttämisen toimintamallissa sähköenergian kulutus pyritään keskittämään ja lisäämään huippukulutuksen piikkien ulkopuolelle, kun kysyntä on muuten vähäistä (Panda ja muut, 2022, s. 3735). Tässä toimintamallissa keskitytään kulutuksen optimointiin, kun talotekniset prosessit ajoitetaan huippukulutuksen piikkien ulkopuolelle. Kuorman siirto taas tarkoittaa kulutuksen siirtämistä huippukulutuksen ajalta hetkiin, jolloin kysyntää on vähemmän, tällöin kuorman määrä pyritään säilyttämään samana (Panda ja muut, 2022, s. 3735). Toimintamallissa on nimensä mukaisesti kyse kuorman siirrosta, kun kulutus halutaan

ajoittaa edullisemman hinnan ajalle. Joustava kuorman muotoilun toimintamalli keskittyy uudelleen järjestelemään kuormien ajoituksen, josta kuluttajalle on tarjolla erilaisia kannustimia (Panda ja muut, 2022, s. 3735). Joustavassa kuorman muotoilussa sovelletaan kaikkia aiemmin esiteltyjä, energiatehokkuuteen vaikuttavia keinoja.

2.3.3 Implisiittinen ja eksplisiittinen kulutusjousto

VTT (2023, s. 5) on määritellyt oppaassaan implisiittiseksi kulutusjoustoksi toiminnan, joka on lähtöisin kuluttajasta itsestään. Käytännössä kohderyhmän toimitsijoina ovat sähkön spot-hintaa seuraavat kotitaloudet, tai esimerkiksi taloyhtiöt. Tällöin hyötyä tavoitellaan säästöjen kautta itselleen, painottamalla sähkönkäyttöä edullisen hinnan ajalle. Samoin pyritään välttelemään ajanjaksoja, jolloin sähkö on kallista. Avainasemassa on kuluttajan reagointi sähkön hinnan muutoksiin ja oman sähkönkulutuksen ajoittaminen.

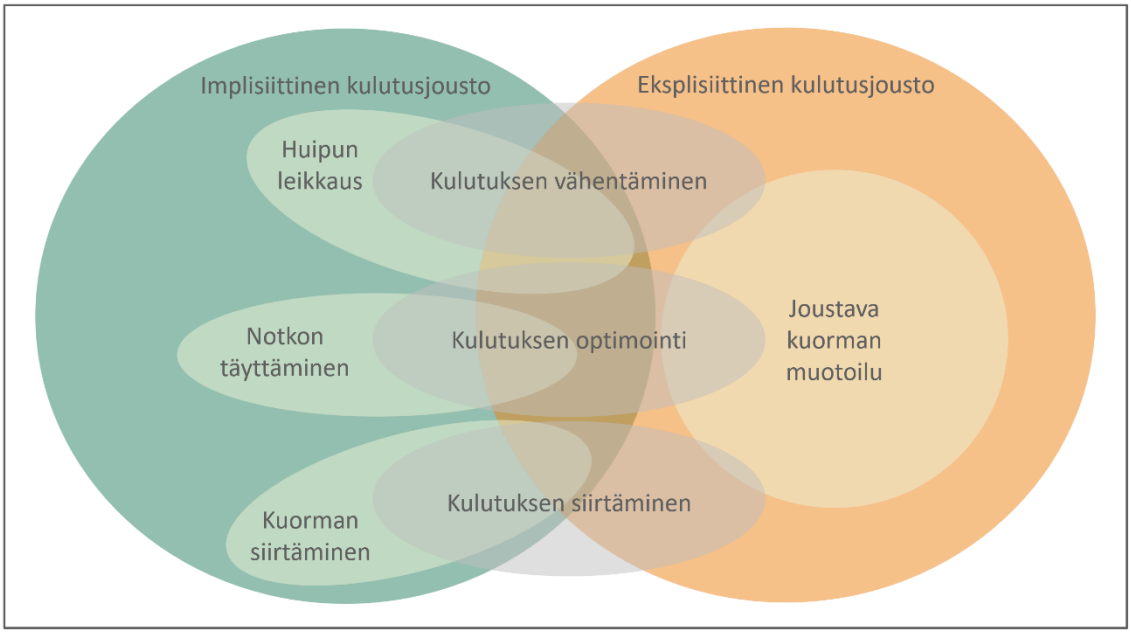
Motiva (2024b) kertoo, kuinka kotitaloudet voivat saavuttaa säästöjä implisiittisen kulutusjouston avulla, jos käytössä on spot-hintaan perustuva sähkösopimus. Säästöjä voidaan myös kerryttää, jos jakeluverkkoyhtiö päättää pienentää tehotariffimaksuja. Tehotariffilla tarkoitetaan sähkön siirtomaksussa tiettyä osaa, joka syntyy ennalta määritellyn ajanjakson sähkön kulutushuipun mukaan. Motivan (2024c) mukaan myös suuritehoisten laitteiden yhtäaikainen käyttö nostaa kulutushuippua. Suurelta kulutushuipulta vältytään jaksottamalla laitteiden käyttöä ja käyttämällä niitä vuorotellen.

Motiva (2024c) esittää myös, kuinka erilaisilla palveluilla ja omalla toiminnalla sähkön kulutus voidaan pyrkiä ajoittamaan halpojen hintojen mukaan, sekä rajoittamaan kulutusta kalleimmilla ajanjaksoilla. Jos kotitalouden lämmitys on toteutettu suoralla sähkölämmityksellä tai esimerkiksi lämpöpumpulla, tai jos käyttövesi lämmitetään sähköllä, toimivan automaation ja aikaohjelmien avulla järjestelmien sähkönkulutus voidaan ajoittaa halvimman sähkön hinnan ajankohtaan. Sähkön käytön optimointia voidaan tehostaa entisestään erilaisilla pientalojen omavaraisilla energiajärjestelmillä, kuten

aurinkopaneeleilla ja energiavarastoilla. Energiavarastoa voidaan ladata, kun sähkön hinta on alhainen, ja käyttää kun sähkön hinnat ovat korkealla.

Eksplisiittisen kulutusjouston VTT (2023, s. 5) on määritellyt olevan toimintaa, joka perustuu ulkopuoliselta taholta lähtöisin olevaan jouston tarpeeseen. Sähkönsiirrossa voi ilmentyä fyysisiä rajoitteita, jonka vuoksi verkon taajuus on laskemassa. Tällöin kulutusta on vähennettävä nopeasti, tai vaihtoehtoisesti tuotantoa kasvatettava jossain muualla. Tällaisessa tilanteessa esimerkiksi kaupalliset toimijat tai muut isojen kiinteistöjen omistajat voivat tarjota joustopotentiaalinsa verkkoyhtiöille. Kappaleessa 2.1. käsitelty kulutusjoustolla hankittava kapasiteettiteho muodostuu juuri eksplisiittisestä kulutusjoustosta.

Erona implisiittinen ja eksplisiittisen kulutusjousto välillä on siis, että implisiittisessä kulutusjoustossa pyritään saavuttamaan säästöjä, kun taas eksplisiittisessä kulutusjoustossa pyritään ansaitsemaan tuottoja sähkömarkkinoilla. Implisiittisessä kulutusjoustossa sähköenergian kuluttaja osallistuu joustoon hyötyäkseen siitä taloudellisesti itse, kun taas eksplisiittinen kulutusjousto on lähtöisin jonkun muun ulkopuolisen toimijan tarpeesta. Sähköenergian hinta ohjaa implisiittistä kulutusjoustoa ja erilaiset korvaukset ja maksut eksplisiittistä kulutusjoustoa. Vaihtelua esiintyy myös kohderyhmien välillä riippuen siitä, kumpaan kulutusjoustoon halutaan osallistua. Kuviossa 4 on esitetty Venn-diagrammilla energiatehokkuustoimenpiteiden ja kulutusjoustomallien suhteet implisiittiseen ja eksplisiittiseen kulutusjoustoon.



Kuvio 4. Energiatehokkuus kulutusjoustossa (Grün, 2025).

Implisiittistä kulutusjoustoa toteutetaan kolmella ensimmäisellä toteutusmallilla, huipun leikkauksella, notkon täyttämisellä ja kuorman siirtämisellä. Tavoitteena implisiittisen kulutusjouston toteuttajalla on huipun leikkauksen ja notkon täyttämisen mallien mukaan välttää kulutusta kalleimman sähköenergian hinnan aikaan, sekä vaikuttaa tehotariffimaksuihin. Energiatehokkuuden toteutuskeinoina toimivat kulutuksen vähentäminen ja optimointi. Kuorman siirron toimintamallissa implisiittiseen kulutusjoustoon osallistuvalla taholla on tarkoituksena käyttää alkuperäinen määrä sähköenergiaa, mutta siirtää tai aikaistaa käyttöä.

Eksplisiittisessä kulutusjoustossa toteutetaan taas viimeistä toteutusmallia, joustavaa kuorman muotoilua. Tarkoituksena on olla valmiina joustamaan sähköenergian kulutuksesta tarpeen vaatiessa, ja toteutuskeinona ovat kulutuksen vähentäminen, optimointi ja siirtäminen. Eksplisiittisen kulutusjouston toteuttaja voi myös harjoittaa samaan aikaan muita kulutusjoustomalleja energiatehokkuustoimenpiteinä, jolloin saadaan joustavasta kuorman muotoilusta maksettavan korvauksen lisäksi pieniä säästöjä sähköenergian kulutuksessa.

3 Sähköverkosto ja -markkinat

Jatkuva sähkön jakelu on yksi nykyaikaisen modernin maailman perusoletuksista. Keskeytyksetöntä sähkön jakelua varten tarvitaan kestävä ja vakaa sähköverkko, mutta lisäksi myös toimivat ja kilpailukykyiset markkinat. Sähköverkon tärkein tehtävä on siirtää häiriöttömästi sähköenergiaa tuotantolaitokselta kuluttajalle, varmistaen keskeytyksettömän ja käyttäjäystävällisen elinympäristön. Sähköverkko ja siihen liittyvät sähkömarkkinat ovat monimutkainen järjestelmä.

Suomen valtakunnallisesta sähkövoimajärjestelmästä vastaa kantaverkonhaltija Fingrid (2025a), jonka vastuulla on kantaverkon tekninen toimivuus ja käyttövarmuus. Suomessa sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, jakeluverkoista ja kuluttajista. Kantaverkon ja jakeluverkkojen erona on, että kantaverkko mahdollistaa tuottajien ja kuluttajien välisen kaupan valtakunnallisesti sekä valtakunnan rajojen yli, kun taas jakeluverkoilla sähköä siirretään alueellisesti. Vattenfall (n.d. -a) täsmentää, että koska sähköenergian jakeluverkon rakentaminen ja ylläpitäminen on todella kallista, kyseisellä jakeluverkkoyhtiöllä on yksinoikeus jakaa sähköenergiaa omassa verkossaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kuluttajalla on mahdollisuus valita vain sähköenergian tuottava yritys, mutta ei sähköverkkoyhtiötä, joka huolehtii sähköenergian jakelusta ja jakeluverkosta.

Vattenfall (n.d. -a) selittää, kuinka arkikielessä puhutaan helposti sähköntoimituksesta. Todellisuudessa sähköntoimitus koostuu sähkönjakelusta ja sähkönmyynnistä. Sähkönjakelulla tarkoitetaan sähkön fyysistä siirtämistä kuluttajalle, kun taas sähkönmyynnillä tarkoitetaan sähköstä käytävää kauppaa avoimella markkinalla. Fingrid (2025a) on määritellyt sivuillaan kantaverkonhaltijan tärkeäksi vastuuksi huolehtia valtakunnallisesta tasevastuusta ja taseselvityksestä markkinoiden eri osapuolten kannalta tasapuolisesti ja syrjimättömästi.

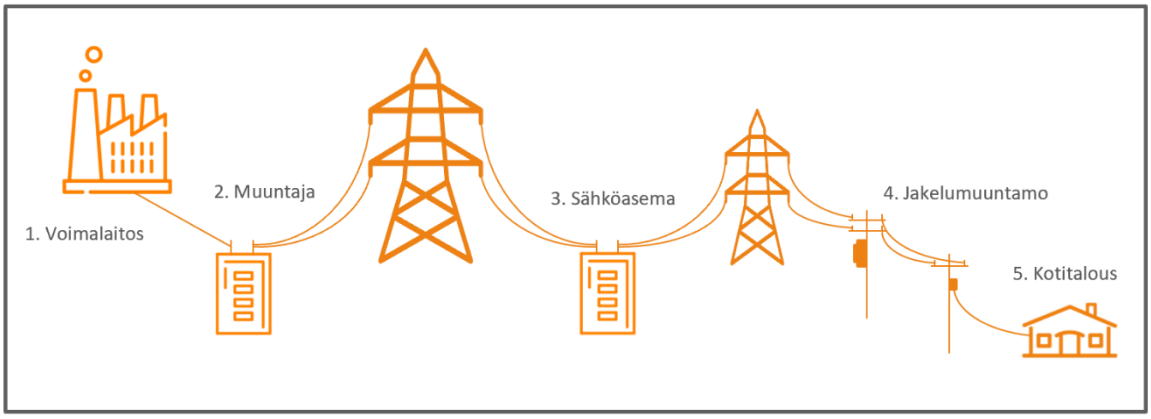
3.1 Sähköverkoston rakenne ja toiminta

Electrical technology (n.d.) artikkelin mukaan yksinkertaistettuna sähköverkko voidaan jakaa kolmeen eri osaan. Nämä osat ovat tuotanto, sähkövoiman siirto ja jakelu. Sähkövoimaa tuotetaan voimalaitoksissa, joista sitä täytyy siirtää pitkiäkin matkoja. Energiateollisuuden (n.d. -b) sivuilla kerrotaan, että sähkövoiman siirrosta puhuttaessa Suomessa, käytetään nimitystä kantaverkko. Kantaverkon tarkoituksena on pienentää siirtohäviöitä. Siirtohäviöitä saadaan pienennettyä korkealla jännitteellä, joka kantaverkossa vaihtelee 110–400 kV. Kantaverkkoa voidaan ajatella ikään kuin sähköverkon runkona, kun taas sitten nimensä mukaisesti jakeluverkko toimii sähkön jakelussa kuluttajille. Suomen kantaverkon ylläpidosta, suunnittelusta ja kehittämisestä huolehtii Fingrid (2025a). Kantaverkon pitkän aikavälin optimointia ja tulevaisuuden toimintavarmuutta varten on laadittu erilaisia kehittämissuunnitelmia, jotka ovat yhteensovitettu koko Euroopan kattavan verkkosuunnitelman kanssa. Tärkeitä osa-alueita verkon kehittämisessä ovat riittävä siirtokapasiteetti, käyttövarmuus sekä hankkeiden laatu ja kustannusten analysointi.

Energiateollisuus (n.d. -b) on määritellyt jakeluverkot jaettavaksi kolmeen eri ryhmään. Suurjännitteisen verkon toiminta-alue on 110–400 kV, keskijännitteisen verkon 1–36 kV, ja pienjännitteisen verkon 0,4–1 kV. Suurjännitteiset jakeluverkot kytkeytyvät suoraan kantaverkkoon. Keski- ja pienjännitteiset verkot voivat kytkeytyä joko suurjännitteiseen jakeluverkkoon tai vaihtoehtoisesti suoraan kantaverkkoon. Perinteiset kotitaloudet liittyvät jakeluverkkoon. Enemmän sähköä tarvitsevat toimijat, kuten kaupat, palvelut, maatalous, teollisuus sekä myös voimalaitokset, voivat liittyä tarpeensa mukaan kaikkiin eri verkkoihin. Poikkeuksena tästä ovat suuret tuulivoimapuistot, joita ei liitetä jakeluverkkoon.

Energiateollisuus (n.d. -b) kertoo, kuinka eri jännitteiset sähköverkot yhdistyvät toisiinsa solmupisteistä, eli sähköasemista. Sähköasemien tarkoituksena on muuntaa sähkön jännitettä, jotta sitä voidaan jakaa eteenpäin verkostossa. Sähköasemat siis keskittävät sähkön jakelua. Sähköverkoston loppupäässä ovat jakelumuuntamot, jotka muuntavat

korkeita siirtojännitteitä kotitalouksille sopivaksi pienjännitteeksi. Esimerkiksi pylväisiin, erillisiin muuntamorakennuksiin tai vaikka kerrostalon kellariin voidaan sijoittaa jakelumuuntamoita. Kuviossa 5 on esitetty sähköverkon rakenne.



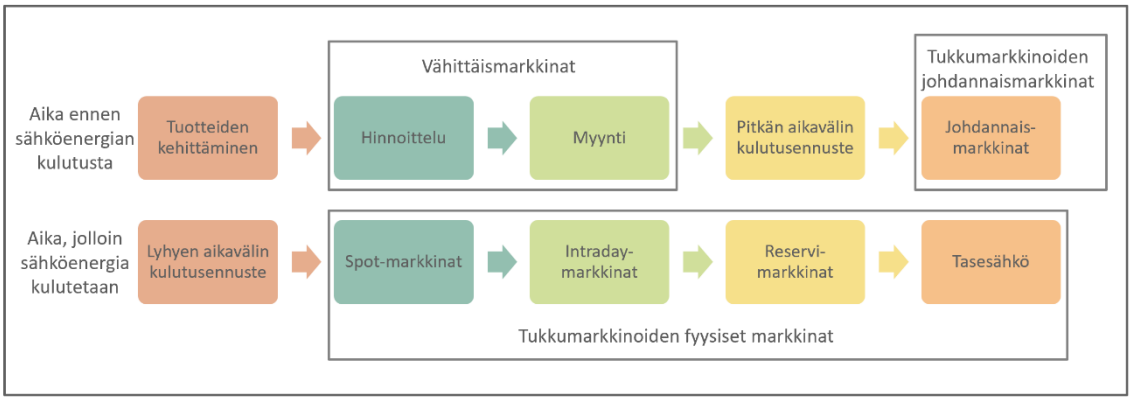
Kuvio 5. Sähköverkon rakenne (Electrical technology, n.d.).

Kuviossa 5 on esitetty kohdassa 1 voimalaitos, jossa sähkö tuotetaan. Voimalaitos on yhdistetty kohdan 2 muuntajan kautta esimerkiksi kantaverkkoon. Kohdassa 3 on sähköasema, joka laskee kantaverkosta tulevan sähkövoiman jännitteen sopivaksi suurjännitteiseen jakeluverkkoon tai suoraan jakeluverkkoon. Kohdassa 4 on jakelumuuntamo ja kohdassa 5 kotitalous.

Fingridin (2024a) sivuilla on selitetty, mitä käytössämme oleva sähköverkko vaatii toimiakseen. Jotta sähköverkko toimii häiriöttömästi, on sen pysyttävä jatkuvasti tasapainossa. Tasapainossa pysyäkseen, sähköä on tuotettava verkkoon koko ajan yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Sähköverkon taajuus kuvastaa tuotannon ja kulutuksen tasapainoa. Tasapainotilassa sähköverkko on vakaa, eli sen taajuus on 50 Hz. Tätä kutsutaan valtakunnalliseksi tasevastuuksi (Fingrid, 2025a). Suomen sähköverkon tilaa ja taajuutta voi seurata reaaliajassa Fingridin sivuilta (2024b).

3.2 Sähkömarkkinat

Fingrid (2025d) kertoo sähkömarkkinoiden jakautuvan kahteen erityyppiseen markkinaan: vähittäismarkkinoihin ja tukkumarkkinoihin. Vähittäismarkkinoilla sähkönmyyjät käyvät kauppaa sähköenergiasta kuluttajien kanssa. Tukkumarkkinoilla taas sähköenergian tuottajat käyvät kauppaa joko sähkönmyyjien tai suurten loppukuluttajien kanssa. Energiateollisuuden (n.d. -c) mukaan myös tukkumarkkinat jakautuvat kahteen erityyppiseen markkinaan, fyysisiin markkinoihin sekä johdannaismarkkinoihin. Fyysisillä markkinoilla kauppaa käydään fyysisestä sähköenergiasta. Johdannaismarkkinoilla kauppaa käydään taas sähköjohdannaisista, eli arvopapereista. Johdannaismarkkinoiden tarkoituksena on kiinnittää etukäteen sähkön osto- tai myyntihintaa. Kuviossa 6 on esitetty sähkömarkkinoiden rakenne ja eri markkinatyyppien ajoitukset sähköenergian kulutuksen suhteen.



Kuvio 6. Sähkömarkkinoiden rakenne energian kulutuksen aikajanalla (Rautiainen, 2024, s. 11).

Rautiaisen (2024, s. 8) mukaan sähkömarkkinat toimivat käytännössä niin, että sähkönmyyjä hinnoittelee vähittäismarkkinoille kiinteähintaisia sähkösopimuksia. Sähkösopimusten perusteella luodaan pitkän ajan kulutusennuste tulevalle vuodelle. Pitkän ajan kulutusennusteen avulla sähkönmyyjä kiinnittää sähköenergian ostohintaa ostamalla sähköjohdannaisia johdannaismarkkinoilta. Sähköjohdannaisten avulla myös voimalaitokset saavat kiinnitettyä tuotetun sähköenergian myyntihintaa ennakkoon.

Pitkän ajan kulutusennusteen lisäksi Fingrid (2024c, Markkinapaikat, Vuorokausimarkkinat) kertoo sähkönmyyjien luovan myös lyhyen ajan kulutusennusteen aina seuraavalle vuorokaudelle. Jokaiselle vuorokauden tunnille arvioidaan sähköenergian kulutus erikseen. Lyhyen ajan kulutusennusteen avulla sähkönmyyjät tekevät ostotarjoukset sähköpörssiin vuorokausimarkkinoille, seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Fingridin (2025d) mukaan vuorokausimarkkinoita kutsutaan myös day-ahead-markkinoiksi tai spot-markkinoiksi. Myös sähköenergian tuottajat jättävät myyntitarjouksensa vuorokausimarkkinoille.

Spot-markkinat toimivat siten, että osapuolet ilmoittavat erikseen tuntikohtaisesti, kuinka paljon he ovat valmiita ostamaan tai myymään sähköenergiaa eri hinnoilla (Fingrid, 2024c, Markkinapaikat, Vuorokausimarkkinat). Nord Pool (2020) esittää sivuillaan, että jokaiselle tunnille tulee ilmoittaa sähköenergian volyymit vähintään kahdella hinnalla. Tarjouksista muodostetaan tuntikohtaisesti osto- ja myyntikäyrät, joiden leikkauspisteestä löytyy kyseisen tunnin spot-hinta ja kaupattu volyymi. Motiva (2024b) kertoo järjestämässään Asiaa energiasta -seminaarissa, kuinka sähköpörssin hinnoittelussa, kuten vuorokausimarkkinoilla, tullaan lähitulevaisuudessa siirtymään varttihintoihin. Tasejaksoissa varttihintoihin on jo siirrytty.

Jos vuorokausimarkkinoilta ostettu sähköenergia ei tule riittämään, Fingridin (2024c, Markkinapaikat) mukaan voidaan lisää sähköenergiaa ostaa päivän sisäiseltä markkinalta, intraday-markkinalta. Jos tästä huolimatta sähköenergian kulutus on ennustettua suurempi ja sähköverkon taajuus laskee alle 49,9 Hz, reservimarkkinoiden kulutusjoustokapasiteetit alkavat aktivoitumaan yksitellen. Reservimarkkinoiden tarkoituksena on siis ylläpitää sähköverkon tehotasapainoa, josta aiheutuvat kustannukset välitetään verkko- ja tasepalvelumaksuina sähköenergian käyttäjille ja tuottajille. Rautiainen (2024, s. 10) kertoo, että tällöin sähkönmyyjän täytyy tasevastaavana ostaa puuttuva sähköenergia jälkikäteen tasesähkönä. Hinta tasesähkölle määräytyy vajaaksi jääneiden tuntien osalta

reservimarkkinoilla aktivoituneiden reservikapasiteettien kauppahinnoista. Reservimarkkinoita käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3.

Rautiaisen (2024, s. 10) mukaan aina kuluneen kuukauden lopulla sähkönmyyjä joko maksaa tai saa rahaa toteutuneiden sähköjohdannaiskauppojen perusteella. Tätä kutsutaan nettoarvon tilitykseksi. Lopulta sähkönmyyjä lähettää loppukuluttajalle laskun, johon on laskettu yhteen mahdollinen kiinteä sähkösopimuksen hinta, spot-, intraday- ja tasekustannukset sekä nettoarvon tilitykset, joiden perusteella laskun lopullinen summa määräytyy.

Rautiaisen (2024, s. 13) esittää sähköenergian vähittäismarkkinoiden olevan vapaat ja kilpaillut. Sähköyhtiöt tarjoavat haluamiaan tuotteita, eli sähkösopimuksia markkinoille, ja tarjonta elää ajan mukana. Kotitalouksille perinteisiä sähkösopimuksia ovat määräaikaiset ja toistaiseksi voimassa olevat sähkösopimukset. Määräaikaiset sopimukset ovat kiinteähintaisia, ja voimassa yleensä yhdestä kahteen vuotta. Toistaiseksi voimassa olevan sopimuksen irtisanomisaika on 14 vuorokautta, ja ne voivat olla joko pörssisähkösopimuksia, tai perinteisiä kiinteähintaisia sopimuksia, joiden hinnoittelu tarkastetaan tietyin väliajoin. Yrityksille on tarjolla myös määräaikaisten ja toistaiseksi voimassa olevien sopimusten lisäksi salkunhoitosopimuksia, yhteishankintasalkkusopimuksia, sekä Power Purchase Agreement -sopimuksia, jos kyseessä on todella suuri loppukuluttaja.

3.3 Reservimarkkinat

Suomessa kulutusjouston joustopotentiaalia voidaan myydä sähkömarkkinoilla, jossa joustopotentiaalille on olemassa oma markkinapaikkansa, kantaverkkoyhtiö Fingridin (2024c, Markkinapaikat) ylläpitämät reservimarkkinat. Fingridin (2024a, Reservimarkkinat) reservimarkkinoilta hankkima kapasiteetti, eli reservi, on tarkoitettu tasapainottamaan tuotannon ja kulutuksen eroavaisuuksia. Reservimarkkinoilla korvauksia maksetaan ylläpidetystä säätökapasiteetista ja mahdollisesta reservin aktivoitumisesta.

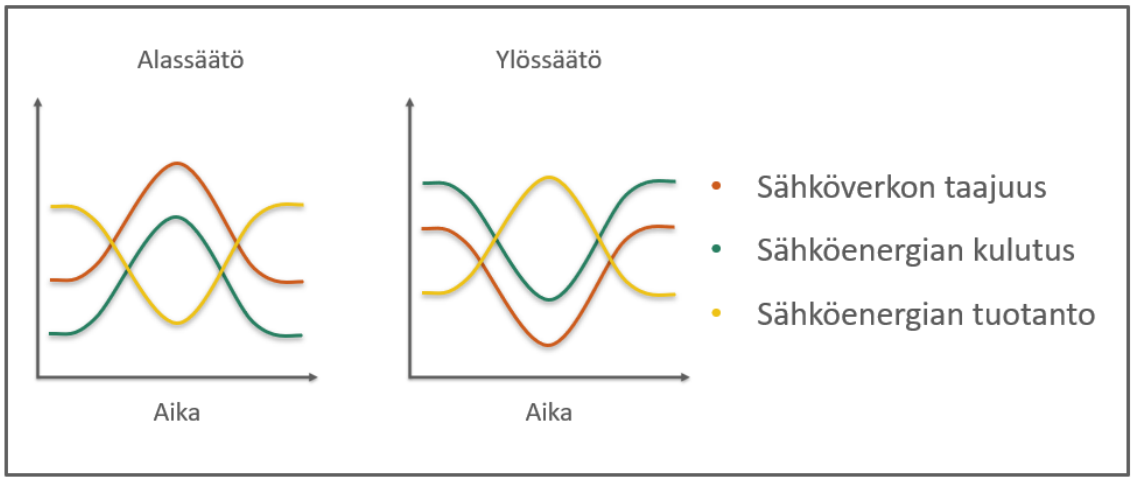
Korvauksen hinta määräytyy marginaalihinnoittelulla, eli reservimarkkinoilla tehdyn kalleimman hyväksytyn tarjouksen mukaan.

Fingridin (2024a, Reservimarkkinat) reservimarkkinoilla voidaan toimia pääasiallisena liiketoimintana tai muun liiketoiminnan ohessa, mutta myös pienemmät yksittäiset toimijat, kuten taloyhtiöt, ovat tervetulleita mukaan. Reservimarkkinoille mukaan pääseminen vaatii kuitenkin tietyn suuruisen säätökapasiteetin, säätöä ohjaavaa ja vaatimukset täyttävää tekniikkaa, tarvittavia tietoliikenneyhteyksiä sekä kaupankäyntiin ja järjestelmän valvomoon liittyvää toimintaa. Markkinoille pääsyä rajoittaa myös jonkin verran sijainti, sillä aktivoitavan reservin tulee sijaita Manner-Suomessa (Fingrid, 2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, Kuinka osallistua reservimarkkinoille).

Fingridin (2024a, Sähköjärjestelmän reservit) reservimarkkinoilla on tarjolla yhteensä viisi erilaista reservituotetta, jotka soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. Reservituotteiden tarkoituksena on toimia yhtenä kokonaisuutena sähköverkossa vallitsevissa erilaisissa tilanteissa, jonka vuoksi eri reservituotteilla on erilaiset tekniset vaatimukset. Reservituotteet on jaoteltu käyttötarkoituksen perusteella kolmeen eri ryhmään, jotka ovat taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR (Frequency Containment Reserve), taajuuden palautusreservi FRR (Frequency Restoration Reserve) sekä nopea taajuusreservi FFR (Fast Frequency Reserve). FCR:n tarkoitus on hallita automaattisesti ja jatkuvasti sähköverkon taajuutta. FRR palauttaa sähköverkon taajuuden takaisin normaalialueelle, ja vapauttaa FCR:t takaisin valmiuteen. FFR:n tarkoitus on hallita pienen inertian tilanteita. Vattenfall (n.d. -b, kappale 3) on selittänyt artikkelissaan, että ”inertia tarkoittaa sähköjärjestelmän pyöriviin massoihin varastoituneen liike-energian tuomaa kykyä vastustaa muutoksia taajuudessa”. Eri reservituotteita käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Eri käyttötarkoituksien lisäksi Fingridin (2024a, Sähköjärjestelmän reservit) reservituotteita voidaan luokitella myös aktivointinopeuksien, aktivointitavan sekä säätösuunnan mukaan. Aktivointinopeudet ovat useimmiten muutamien sekuntien luokkaa, mutta

hitaammissa reservituotteissa aktivointinopeus on muutamia minuutteja. Reservin aktivoituminen voi perustua joko taajuusmittaukseen, aktivointisignaaliin tai aktivointipyyntöön, aktivoituminen on siis joko automaattista tai manuaalista. Reservien säätösuunnalla tarkoitetaan sitä, että säätääkö kyseinen reservituote sähköverkon taajuutta ylös vai alas. Tällöin puhutaan ylössäädöstä ja alassäädöstä. Reservituotteet ovat myös symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Symmetrisessä tuotteessa reservin tulee kyetä sekä ylös-, että alassäätöön. Epäsymmetrisessä tuotteessa taas reservin tulee kyetä vain toiseen säätösuuntaan, riippuen kyseisestä reservituotteesta. Ylös- ja alassäädön toiminnan periaatteet on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Ylössäädön ja alassäädön toiminnan periaatteet (Grün, 2025).

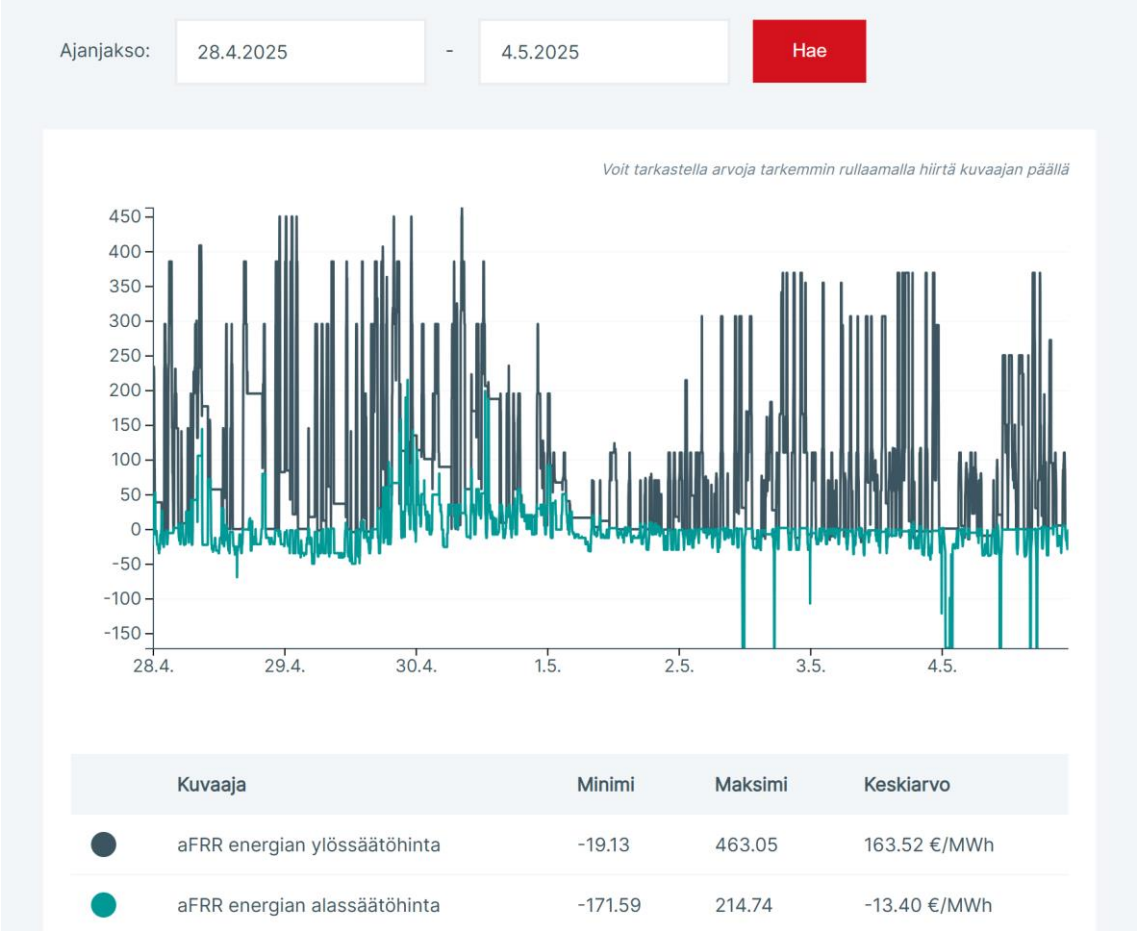
Kuviosta 7 nähdään, kuinka alassäädössä sähköverkon taajuus lähtee nousemaan, jolloin taajuutta on säädettävä alaspäin. Sähköverkon taajuutta voidaan laskea joko kuluttamalla enemmän sähköenergiaa, tai vaihtoehtoisesti vähentämällä sähköenergian tuotantoa. Ylössäädössä taas taajuus lähtee laskemaan, jolloin sitä on säädettävä ylöspäin. Taajuutta saadaan nostettua joko vähentämällä sähköenergian kulutusta, tai lisäämällä sähköenergian tuotantoa.

Reserviä Fingrid (2024a, Reservimarkkinat) hankkii kapasiteetti- ja energiamarkkinoilta, ja tarvittaessa myös pohjoismaisilta tai eurooppalaisilta reservimarkkinoilta. Kaikki reservimarkkinoilla olevat tuotteet kuuluvat kapasiteettimarkkinaan, mutta vain osa näistä kuuluu lisäksi myös energiamarkkinaan. Kapasiteetti- ja energiamarkkinoiden erona on se, että kapasiteettimarkkinoilla korvaus maksetaan säätökyvyn ylläpidosta eli valmiudesta tehon muutosta varten. Energiamarkkinoilla korvaus taas maksetaan aktivoituneesta kapasiteetista.

Fingridin (2024a, Reservimarkkinat) kapasiteettimarkkinat toimivat tunti- ja vuosimarkkinoilla, kun taas energiamarkkinat toimivat varttitasolla. Tuntimarkkinoilla reservitoimittaja jättää tarjoukset reservistään seuraavan vuorokauden tunneille, ja syntyneistä kaupoista maksetaan kapasiteettikorvaus. Vuosimarkkinoilla järjestetään syksyisin kilpailutus seuraavan vuoden hankinnasta. Vuosimarkkinakapasiteetin ylläpidosta maksetaan seuraavan kalenterivuoden aikana hankinnan mukainen hinta kilpailutuksessa hyväksytyille reservitoimittajille. Vuosimarkkinakapasiteettia ei ole pakko ylläpitää, mutta sitä ei myöskään saa tarjota tuntimarkkinoille. Seuraavan vuorokauden tunneilla ylläpidetyt vuosimarkkinakapasiteetit tulee ilmoittaa Fingridille edellisenä päivänä. Varttitasolla toimivalla energiamarkkinalla tarjous on voimassa 15 minuuttia, mutta itse markkina-aikajakso on vain 4 sekuntia. Tämä tarkoittaa sitä, että neljän sekunnin välein tarjouksia aktivoidaan hintajärjestyksessä tarjouslistalta. Reservitoimittajien tulee jättää tarjouksensa siis jokaiselle varttitunnille, mutta aktivoituvan reservin määrä ja hinta määräytyy 4 sekunnin välein.

Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, aFFR, automaattinen taajuudenpalautusreservi) energiamarkkinoilla aktivoituneesta reservistä aiheutuneet säätöenergian kustannukset kompensoidaan energiamaksulla. Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, aFFR, automaattinen taajuudenpalautusreservi, Liite 1, kappale 11.2) on esittänyt energiamaksun olevan riippuvainen reservituotteesta ja näin ollen myös säädön suunnasta. Ylössäädössä Fingrid maksaa reservitoimittajalle

energiamaksun, kun taas alassäädössä Fingrid veloittaa energiamaksun reservitoimittajalta. Kuitenkin Fingridin (2025b, aFRR-energiamarkkina) alassäädöstä veloittamat energiamaksun hinnat ovat keskiarvollisesti negatiivisia. Tämä tarkoittaa sitä, että säätöenergian lopullinen hinta (positiivinen tai negatiivinen) määrittää lopullisen maksajan. Kuvassa 4 on esitetty energiamaksun hintojen käyttäytyminen aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve) -energiamarkkinoilla vuonna 2025, viikolla 18.



Kuva 4. Energiamaksun hintojen muutos aFRR-energiamarkkinoilla (Fingrid, 2025b, aFRR-energiamarkkina).

Kuvasta 4 nähdään, kuinka ylössäädössä maksut ovat pääsääntöisesti positiivisia ja alassäädössä negatiivisia. Tällöin siis ylössäädön energiamaksun ollessa positiivinen, Fingrid maksaa energiamaksun reservitoimittajalle. Myös alassäädön ollessa negatiivinen,

Fingrid veloittaa reservitoimittajalta negatiivista energiamaksua eli Fingrid maksaa lopulta rahaa reservitoimittajalle. Kuitenkin molempien markkinoiden minimi energiamaksu on ollut negatiivinen ja maksimi energiamaksu positiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että joidenkin varttituntien aikana Fingrid on maksanut ylössäätömarkkinalla negatiivista energiamaksua. Tässä tilanteessa reservitoimittajalta on todellisuudessa veloitettu rahaa. Sama periaate toistuu alassäätömarkkinalla, kun energiamaksu on ollut positiivinen, Fingrid on veloittanut rahaa reservitoimittajalta.

3.3.1 Taajuusohjattu käyttöreservi, FCR-N

Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi) taajuusohjatun käyttöreservin, eli FCR-N:n (Frequency Containment Reserve for Normal operation) tarkoitus on pitää sähköverkon taajuus normaalitaajuusalueella, joka on 49,9–50,1 Hz. FCR-N on automaattisesti, taajuusmuutoksen mukaan aktivoituva reservituote. FCR-N on symmetrinen, eli tälle markkinalle osallistuvan reservin on kyettävä sekä ylös-, että alassäätöön. Reservituotteen säädön minimikoko on 0,1 MW. Reservin on siis kyettävä muuttamaan tehoaan tämän verran osallistuakseen FCR-N markkinaan. Säädön minimikoosta noin 63 % tulee aktivoitua 1 minuutin aikana ja noin 95 % 3 minuutin aikana. Reservin on toimittava 0,1 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella. FCR-N:llä on myös stabiiliusvaatimus, koska sen on pystyttävä jatkuvaan säätöön. Stabiiliusvaatimus todennetaan siniaaltotesteillä taajuustasossa.

FCR-N:n reserviä Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi) hankkii kapasiteettimarkkinoilta sekä vuosi-, että tuntitasolla. Vuosimarkkinoille pääsee mukaan vain syksyllä kilpailutuksen jälkeen, mutta tuntimarkkinoille voi osallistua heti kun tekniset vaatimukset on todennettu säätökokeilla ja markkinasopimukset on allekirjoitettu. Vaikka FCR-N ei ole mukana energiamarkkinoilla, Fingrid on kuitenkin määritellyt, että aktivoituneen ylös- ja alassäädön mukaan FCR-N:ään osallistumisesta maksetaan energiamaksuja (2024a, Reservimarkkinat;

2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi, Liite 1, kappale 11.2).

3.3.2 Taajuusohjattu häiriöreservi, FCR-D

Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi) taajuusohjattu häiriöreservi, eli FCR-D (Frequency Containment Reserve for Disturbances), on tarkoitettu pitämään sähköverkon taajuus 49,5–50,5 Hz:n välillä silloin, kun sähköverkon taajuus poikkeaa normaalitaajuuden alueelta. Myös FCR-D aktivoituu automaattisesti taajuuden muutoksen mukaan. FCR-D on epäsymmetrinen, eli sillä on omat ylös- ja alassäädön reservituotteet, FCR-D ylös ja FCR-D alas. Reservin tulee siis kyetä vain toiseen säätösuuntaan riippuen siitä, kummalla reservimarkkinalla toimitaan. Säädön minimikoko on 1 MW, josta 86 % tulee aktivoitua 7,5 sekunnin aikana. Säädön vaatimukset ovat samat ylös- ja alassäädössä. FCR-D ylös ja FCR-D alas ovat molemmat joko staattisia tai dynaamisia. Staattisilla FCR-D:llä ei ole stabiiliusvaatimusta, koska ne eivät pysty jatkuvaan säätöön ja tarvitsevat näin ollen enemmän aikaa palautumiseen aktivoitumisen jälkeen. Dynaamisilla FCR-D:llä taas on stabiiliusvaatimus kuten kappaleessa 3.3.1 esitetyllä FCR-N:llä.

Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi) hankkii FCR-D reserviä kapasiteettimarkkinoilta, tunti- ja vuositasolla. Kuten kappaleessa 3.3.1 esitellystä FCR-N:ssä, vuosimarkkinoille pääsee mukaan syksyllä järjestettävässä kilpailutuksessa, ja tuntimarkkinoille kun tekniset vaatimukset ja sopimukset ovat kunnossa. Myöskään FCR-D ei kuulu energiamarkkinaan, mutta siitäkin maksetaan energiamaksuja, kuten FCR-N:stä (2024a, Reservimarkkinat; 2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi, Liite 1, kappale 11.2).

3.3.3 Nopea taajuusreservi, FFR

Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FFR, nopea taajuusreservi) nopean taajuusreservin, FFR:n, tarkoituksena on estää taajuuden putoaminen alle 49 Hz:n. FFR-reserville ei ole määritelty symmetrisyyttä, koska se säätää sähköverkon taajuutta vain ylöspäin. Reservi on siis varalla häiriötilanteita varten, jolloin tarvittavan FFR-reservin määrä riippuu häiriön aiheuttamasta tehon muutoksesta, sähköjärjestelmään kertyneestä inertiasta ja reservien aktivoitumisnopeuksista. Myös FFR:n aktivointi perustuu automaattiseen taajuusmittaukseen. Reservin tulee aktivoitua 0,7–1,3 sekunnissa riippuen sähköverkon taajuudesta. Aktivoinnin vähimmäiskesto riippuu tehon deaktivointinopeudesta, mutta enintään vähimmäiskesto on 30 sekuntia. Reservin on pystyttävä aktivoitumaan uudelleen 15 minuutin kuluttua edellisestä aktivoitumisesta.

Fingrid (Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, FFR, nopea taajuusreservi, Liite 1, kappale 7.1, 9). on määritellyt, että reservin yksittäisen tarjouksen vähimmäiskapasiteetti on 1 MW. FFR kuuluu kapasiteettimarkkinaan, eli ylläpidetystä reservistä maksetaan kapasiteettikorvaus. Kauppaa käydään tuntimarkkinoilla.

3.3.4 Automaattinen taajuuden palautusreservi, aFRR

aFFR, eli automaattinen taajuuden palautusreservi, on Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi) reservituote, jonka tarkoitus on ylläpitää tuotannon ja kulutuksen tehotasapainoa ja palauttaa taajuus takaisin 50 Hz:iin. aFRR:n aktivointi tapahtuu automaattisesti kantaverkkoyhtiön lähettämän signaalin perusteella. aFRR on epäsymmetrinen reservituote, eli sillä on erilliset ylös- ja alassäätömarkkinat. Reserviin mukaan päästäkseen reservikohteen tulee kyetä vähintään 1 MW säätöön ja kapasiteetin tulee aktivoitua 5 minuutissa.

Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi) käy aFRR-reservistä kauppaa kapasiteettimarkkinoilla. Kaupat

solmitaan tuntitasolla, erikseen ylös- ja alassäätömarkkinoilla. Halutessaan reservitoimittaja voi jättää tarjouksia molemmille markkinoille. Fingrid (Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi, Liite 1, kappale 11) on määritellyt, että kapasiteettimarkkinoilla maksetaan kapasiteettikorvaus ylläpidetystä reservistä, ja energiamarkkinoilla energiamaksu aktivoituneesta energiasta.

3.3.5 Manuaalinen taajuuden palautusreservi, mFRR

Manuaalinen taajuuden palautusreservi, eli mFRR (manual Frequency Restoration Reserve) on myös Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi) reservituote, jonka tarkoitus on ylläpitää tuotannon ja kulutuksen tehotasapainoa ja palauttaa taajuus takaisin 50 Hz:iin. Lisäksi mFRR:ää hyödynnetään myös takaamaan käyttövarmuutta siirtojenhallinnalla. Kauppaa mFRR-reservistä käydään sekä kapasiteetti- että energiamarkkinoilla. Molemmilla markkinoilla kapasiteetin on oltava vähintään 1 MW tehon suuruinen.

Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, mFFR, manuaalinen taajuuden palautusreservi, Liite 1, kappale 5, 7.3) mFRR-reservin aktivointi tapahtuu fyysisellä säädöllä. Fingrid lähettää sanoman säätötarjouksesta, johon reservitoimittajan tai tämän valtuuttamaan edustajan on vastattava kahden minuutin kuluessa. Reservin aktivoituessa täysi teho on saavutettava joko 12,5 minuutissa, johon sisältyy 2,5 minuutin valmisteluaika sekä 10 minuutin tehon muutosaika. Vaihtoehtoisesti säädön voi toteuttaa myös nostamalla reservin täydelle teholle 15 minuutin kuluessa aktivoitumisesta. Myös erilaisia aktivoitumisia on olemassa; näitä ovat ajastettu aktivointi (12,5 minuutissa ja 15 minuutissa) sekä suora aktivointi (12,5 minuutissa ja 15 minuutissa), yhteensä siis neljä erilaista aktivointia.

Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi, Liite 1, kappale 7.1, 8.1, 12) on määritellyt, että mFRR-energiamarkkinoilla käydään kauppaa varttitasolla, kun taas ja mFRR-kapasiteettimarkkinoilla

kauppaa käydään tuntitasolla. Sekä energia- että kapasiteettimarkkinat ovat epäsymmetrisiä eli molemmilla on omat markkinapaikat ylös- ja alasäädölle. Fingridin mFRR-reservistä kertovassa liitteessä 1, kappaleessa 12 on esitetty, että kapasiteettimarkkinoilla maksetaan korvaus ylläpidetystä kapasiteetista ja energiamarkkinoilla energiamaksu aktivoituneesta energiasta. Energiamaksu määritellään aktivointitavan mukaan riippuen siitä, onko kyseessä suora aktivointi vai ajastettu aktivointi.

Lisäksi Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi, Liite 1, kappale 8) on määritellyt mFRR-reservimarkkinoille erilaisia rajoitteita kuten kapasiteettimarkkinoille osallistuttaessa, reservitoimittaja sitoutuu jättämään tarjouskilpailussa hyväksytyn määrän verran tarjouksia myös energiamarkkinoille. Tällöin siis reservitoimittaja jättää yhden tarjouksen kapasiteettimarkkinoille ja neljä tarjousta energiamarkkinoille, tunnin jokaiselle vartille. Kolmella ensimmäisellä vartilla säätötarjousten tulee olla suoraan aktivoituvia. Riippuen siitä, onko tarjousta kapasiteettimarkkinoille jätetty seuraavan tunnin osalta, viimeisen vartin säätötarjouksen tulee olla joko suoraan aktivoituva tai ajallisesti aktivoituva. Jos seuraavalle tunnille ei ole jätetty säätötarjousta, viimeisen vartin säätötarjous voi olla ajallisesti aktivoituva.

4 Kiinteistöjen osallistuminen reservimarkkinoille

Edellisten lukujen perusteella voidaan todeta, että kiinteistöltä vaaditaan kohtuullisen paljon reservimarkkinoille mukaan päästäkseen. Luvussa 2 tarkasteltiin erilaisia kulutusjouston malleja sekä niiden toteutustapoja. Tässä kohtaa on eroteltu, halutaanko kulutusjoustolla säästää vai ansaita. Jos kulutusjoustolla halutaan ansaita rahaa, tarkoittaa se reservimarkkinoille osallistumista. Kuten luvussa 3 kuitenkin todettiin, ainut reservimarkkina, johon kulutusjoustolla pääsee mukaan alle 1 MW teholla, on FCR-N. Kulutusjoustoon osallistuvalta tekniikalta vaaditaan siis suuria tehoja.

Näiden huomioiden perusteella voidaan alkaa tarkemmin tutkimaan kiinteistöjen mahdollisuuksia päästä mukaan reservimarkkinoille. Tärkeinä lähtökohtina ovat kiinteistön joustopotentiaali sekä toimiva ja kattava rakennusautomaatio. Joustopotentiaalia on aina mahdollista kasvattaa myös lisäinvestoinneilla, jos reservimarkkinoista halutaan saada suurempia tuottoja. Ennen reservimarkkinoille ryhtymistä sekä mahdollisesti kalliiseen tekniikkaan investoimista, on kuitenkin hyvä arvioida myös reservimarkkinoilta saatavaa taloudellista hyötyä sekä perehtyä mahdollisten ennusteiden hyödyntämiseen.

4.1 Mitä reservimarkkinoille osallistuminen vaatii

Reservimarkkinoille osallistuttaessa lähtökohtina ovat säädettävän kapasiteetin koko, järjestelmien ohjattavuus sekä toimiva datan kerääminen. Järjestelmien sähköenergian käyttöä on pystyttävä seuraamaan sekä ohjaamaan hallitusti ja automaattisesti, jotta kulutusjoustoa pystytään toteuttamaan (Motiva, 2024b). VTT (2023, s. 11) kertoo oppaassaan, että järjestelmistä tulee tietää seuraavia tietoja; laitteiden tila eli ovatko ne päällä vai ei, järjestelmien joustopotentiaali, eli kuinka paljon säädettävää kapasiteettia on käytettävissä, kuinka järjestelmän ohjaus toimii sekä sijainti, jolloin voidaan paikallisesti reagoida verkon häiriötilanteisiin. Automaattiset, taajuusmittaukseen perustuvat FCR- ja FFR-reservit vaativat toimiakseen tehonsäätäjän, joka ohjaa automaattisesti kiinteistön järjestelmien tehoa taajuusmittauksen mukaisesti (Fingrid, 2024a, Reservituotteet ja

markkinoille osallistuminen, FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi). VTT:n (2023, s. 11) mukaan myös erilaisia mittauksia on hyvä suorittaa; energiamittauksilla voidaan seurata kulutusjouston toimivuutta ja optimoida järjestelmiä, kun taas lämpötila-, ilmankosteus- ja hiilidioksidimittauksilla seurataan kiinteistön sisäilman olosuhteita. Tällöin voidaan seurata kulutusjouston vaikutusta sisäilman olosuhteisiin.

Kiinteistön järjestelmien joustopotentiaalin määrittäminen on lähtökohtaisesti kohtuullisen helppoa. Yksinkertaisuudessaan kohdekiinteistön tekniikka käydään läpi ja lasketaan järjestelmien sähkötehot yhteen. Kuitenkaan kiinteistön taloteknisiä järjestelmiä ei voida tarkastella yhtenä kokonaisuutena, koska niissä on huomattavia toiminnallisia ja ajallisia vaihteluita. Esimerkiksi kiinteistön jäähdytys painottuu pääosin jäähdytyskaudelle, kuten myös lämmitys lämmityskaudelle. Ilmanvaihdossa ja valaistuksessa voi olla merkittäviä ajallisia vaihteluita, riippuen kiinteistön käyttöajoista. Järjestelmillä ja laitteilla on myös eri pituisia käynnistys- ja sammutusaikoja. Osan järjestelmien toimintoja tai käyntiaikoja ei voida edes muuttaa, jotta kiinteistön turvallisuus, olosuhteet tai tarkoituksen mukainen toiminta ei häiriintyisi. Tällöin joustopotentiaalin määrittely tulee tehdä järjestelmä- tai jopa laitekohtaisesti.

Joustopotentiaalin kapasiteetin kokoluokan sekä kappaleessa 3.3 mainitun reservin sijainnin vaatimusten lisäksi Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, Kuinka osallistua reservimarkkinoille) on esittänyt muita perusvaatimuksia, joita reservimarkkinoille mukaan pääseminen edellyttää. Reservitoimittajan tulee muun muassa omistaa säätökykyinen reservi tai vaihtoehtoisesti toimia sähköenergian myyjänä tai tasevastaavana. Sähköenergian myyjän tai tasevastaavan on kuitenkin sovittava erikseen reservitoiminnan harjoittamisesta säädettävän kapasiteetin omistajan kanssa. Jos reservitoimittaja ei ole reservikapasiteetin tasevastaava ja toimii aFRR- tai mFRR-reservimarkkinalla, tulee reservitoimittajan sopia erikseen reservitoiminnan harjoittamisesta tasevastaavan kanssa. Fingridille on ilmoitettava kirjallisesti sopimuksesta tasevastaavan kanssa. Reservitoimittajan täytyy myös tehdä reservituotekohtainen sopimus Fingridin

kanssa reservimarkkinoille osallistumisesta. Reservitoimittajan täytyy solmia myös selvityssopimus eSettin kanssa osallistuttaessa FCR-N-, aFRR- tai mFRR-reservimarkkinoille, jos reservitoimittaja ei itse toimi tasevastaavana.

Reserville asetettuja vaatimuksia on esitelty markkinakohtaisesti kappaleessa 3.3, mutta yleisesti Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, Kuinka osallistua reservimarkkinoille) reservimarkkinoille osallistuville reserveille yhteistä on säätökokeiden läpäiseminen. Säätökokeet koskevat automaattisia markkinoita, eli FFR-, FCR- ja aFRR-markkinoita ja niillä varmistetaan, että reservin säätöominaisuudet vastaavat markkinan teknisiä vaatimuksia. Teknisiä vaatimuksia ovat aktivoitumisnopeus, aktivoinnin kesto sekä onko reservillä aikaa palautua. FFR- ja FCR-markkinoiden säätökokeesta tulee ilmoittaa Fingridille 2 viikkoa ennakkoon. Samalla toimitetaan testaussuunnitelma. Reservitoimittaja suorittaa säätökokeet, joihin halutessaan Fingridin edustaja voi osallistua, jonka jälkeen pöytäkirja säätökokeesta toimitetaan tarkastettavaksi. Reservin täyttäessä vaatimukset, Fingrid hyväksyy säätökokeen. aFRR-markkinalla asetetaan tiedonvaihtoyhteydet ennen säätökokeiden suunnittelemista. Kun tiedonvaihtoyhteyden on järjestetty, reservitoimittaja ilmoittaa Fingridille tulevista säätökokeista ja toimittaa testaussuunnitelman kaksi viikkoa ennen säätökokeiden järjestämistä. Säätökokeet suoritetaan yhdessä Fingridin valvojan kanssa, jonka jälkeen pöytäkirja toimitetaan tarkastettavaksi. Säätökoe hyväksytään, jos kohde täyttää vaatimukset. Kuviossa 8 on esitetty, kuinka reservimarkkinoille osallistuminen käytännön tasolla etenee.

Kuvio 8. Reservimarkkinoille osallistumisen eteneminen (Fingrid, 2024a).

Kuten kuviossa 8 on esitetty, useimmiten reservimarkkinoille osallistumine aloitettaan ottamalla yhteyttä Fingridin (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen,

Kuinka osallistua reservimarkkinoille) asiantuntijaan. Eri vaiheiden työt voidaan kuitenkin tehdä myös itse, tai erilaisten palveluntarjoajien avustuksella. Selvitystyöhön kuuluu kohteen kulutusjoustopotentiaalin soveltuvuuden selvittämistä eri reservimarkkinoilla, sekä tietoliikenneyhteyksien selvittämistä ja järjestämistä. Vasta säätökokeiden suorittamisessa Fingrid todella osallistuu prosessiin tarkastamalla säätökokeiden tulokset, joissain tapauksissa myös valvomalla säätökokeita. Kun säätökokeilla on varmistettu kohteen soveltuvuus markkinoille, voidaan reservisopimukset allekirjoittaa, tiedonvaihdon ja kaupankäynnin sanomaliikenteen järjestelmät kytkeä ja käyttäjätunnukset luoda kaupankäyntijärjestelmiin. Kaupankäyntiluvan saamisen jälkeen toiminta markkinoilla voidaan aloittaa.

4.2 Teknisiä vaihtoehtoja reservimarkkinoille osallistumiseen

Kuten aiemmin on jo nostettu esille, lähes kaikkien reservimarkkinoiden vaatimuksena on vähintään 1 MW säätökapasiteetti, jotta markkinalle pääsee mukaan. Perinteisistä kotitalouksien taloteknisistä järjestelmistä harvoin löytyy näin suuria sähkötehoja omaavia yksittäisiä laitteita, jonka vuoksi on pohdittu erilaisten vaihtoehtojen soveltuvuutta reservimarkkinoille. Pienemmille toimijoille markkinoidaan mukaan liittymistä palveluntarjoajien avulla, kun taas suurille yrityksille erilaisia laiteinvestointeja.

4.2.1 Virtuaalivoimalat eli aggregaattorit

Fingrid (2024a, Reservituotteet ja markkinoille osallistuminen, Kuinka osallistua reservimarkkinoille) on määritellyt eri reservimarkkinoille minimikapasiteetit, joilla markkinalle pääsee mukaan, mutta kyseinen reservin kapasiteetti voi muodostua myös useammasta resurssista, jotka on yhdistetty yhdeksi suureksi kokonaisuudeksi. Tätä kutsutaan aggregoinniksi. Tällöin yksittäisten resurssien ei tarvitse täyttää reservimarkkinan vaatimuksia, jos aggregoitu kohde täyttää vaatimukset. Fingridin (2024a, Reservimarkkinat, Reservikohteen aggregointi) mukaan reservitoimittaja voi itse aggregoida omistamansa pienemmät säätökohteet yhdeksi suuremmaksi kokonaisuudeksi, eli esimerkiksi kiinteistösalkun

haltija voisi aggregoida kohteensa yhteen. Myös erilaisia palveluntarjoajia toimii markkinoilla, joiden portfolioihin on mahdollista liittyä mukaan. Kuviossa 9 on esitetty aggregoinnin periaate pelkistetysti.

Kuvio 9. Aggregoinnin periaate (Grün, 2025).

Sähkömarkkinalaissa (588/2013) 3 §:ssä on määritelty, että aggregoinnilla tarkoitetaan toimintaa, jossa usean verkon käyttäjän kapasiteettia yhdistetään sähkömarkkinoille kaupattavaksi. Itsenäinen aggregaattori taas on määritelmän mukaan toimija, jolla ei ole sidoksia sähköenergian loppukäyttäjän toimittajaan. Fingridin (2024c, Yhtenäiset sähkömarkkinat, Sähkömarkkinoiden kehityshankkeet, Itsenäinen aggregointi) mukaan itsenäisen aggregoinnin salliminen reservimarkkinoilla on tärkeää, koska sillä voidaan mahdollistaa sähköenergian loppukuluttajille uusia mahdollisuuksia osallistua reservimarkkinoille. Tällä hetkellä itsenäinen aggregointi on sallittua FCR- ja FFR-markkinoilla, jolloin resursseja voidaan kerätä useamman tasevastuun piiristä. Sähkömarkkinalain (588/2013) 72 a §:ssä on määritelty, että itsenäisen aggregaattorin on korvattava toteuttamastaan kulutusjoustosta aiheutuneet kustannukset asiakkaidensa sähköenergian toimittajille tai näiden tasevastaaville. Laissa on myös määrätty, että kantaverkonhaltijana Fingridin tehtävä on määritellä maksettavan korvauksen laskentamenetelmä.

Motivan (2024b) Asiaa energiasta -webinaarissa Fingridin edustaja kertoo aggregaattoreiden olevan useimmiten yrityksiä, jotka ovat allekirjoittaneet Fingridin kanssa sopimuksen reservimarkkinoilla toimimisesta. Fingrid itse ei siis aggregoi mitään kohteita. Kaikki reservitoiminnasta maksettavat tuotot ja sanktiot ohjautuvat aggregoivalle yritykselle. Aggregoiva yritys päättää itse, mitä he tekevät reservimarkkinoilta saatavien tuottojen tai mahdollisten sanktioiden kanssa. Reservimarkkinoilta saatavia tuottoja ja sanktioita käsitellään lisää kappaleessa 4.3. Näistä ehdoista aggregaattori sopii asiakkaidensa kanssa omissa sopimuksissaan. Fingridillä ei ole valtaa vaikuttaa aggregoivien yritysten ja heidän asiakkaidensa välisiin sopimuksiin.

Fingridin edustaja kertoo Motivan (2024b) webinaarissa, että haasteellisinta hajautettujen kohteiden aggregoinnissa on ohjattavuus ja osapuolien välinen tiedonvaihto. Ongelmia alkaa ilmenemään, jos yksittäiset resurssit eroavat huomattavasti toisistaan. Jos kyseessä on jo olemassa olevat laitteet, kuten esimerkiksi akustot, niin haasteena on toimivan ohjausjärjestelmän rakentaminen. Joidenkin markkinoiden vaatimuksena on myös, että reservi aktivoituu sekunneissa eli reservitoimittajan tiedonvaihto Fingridin ja resurssiensa kanssa on oltava kunnossa.

Vaikka aggregointi mahdollistaa pienillä resursseilla reservimarkkinoille mukaan pääsemisen, niin siihen liittyy muutama seikka, joita kannattaa pohtia ennen toiminnan aloittamista. Taloyhtiöiden ja muiden pienien toimijoiden kannattaa olla tarkkana aggregoivien yrityksien sopimuksien kanssa, että kaikki tärkeät yksityiskohdat ovat kunnossa, ja että toiminta on rehellistä ja läpinäkyvää. Aggregoivan yrityksen asiakkaana on myös riskinä, että yritys ei hoida velvollisuuttaan markkinoilla kunnolla, jonka seurauksena tulee Fingridiltä sanktioita maksettavaksi. Aggregoivan yrityksen taas tulee tunnistaa järjestelmissään teknisesti riittämättömät kohteet, ja osattava jättää nämä markkinoiden ulkopuolelle. Yrityksellä täytyy myös olla riittävä tietotaito markkinoilla toimimiseen, sekä ymmärrystä tekniikan suunnittelusta, ylläpidosta ja huollosta.

4.2.2 Energiavarastot

Reservimarkkinoilla ovat tällä hetkellä suuresti esillä erilaiset energiavarastojen, eli valtavien modulaaristen sähköakustojen valmistajat ja markkinoijat. Akkuteknologia on suoraviivainen toimintatapa reservimarkkinoilla toimittaessa. Käytännössä akkuja hyödynnetään kulutusjoustossa siten, että niitä ladataan silloin kun sähköverkossa on tarve alassäädölle, ja akuista puretaan sähköenergiaa verkkoon silloin kun on tarvetta ylössäädölle.

Huomionarvoista energiavarastoissa kuitenkin on kalliit investoinnit, sekä akkujen lyhyt käyttöikä reservimarkkinakäytössä. Astero ja Evens (2020) tutkivat energiavarastojen optimoitua käyttöä Suomen reservimarkkinoilla, sekä analysoivat samalla taajuusohjaukseen perustuvien ohjausmekanismien vaikutusta energiavarastojen käyttöikään. Kyseessä on siis tehonsäätäjä, jota käsiteltiin luvussa 4.1. Astero ja Evens (2020, s. 4906) esittävät, että vaikka energiavarastot reagoivatkin hyvin nopeassa ajassa taajuuden muutokseen, niin heidän tuloksien (s. 4914) mukaan Pohjoismaissa vallitsevan akustojen kapasiteetin palautusjärjestelmien rajoitteiden myötä energiavarastojen kannattavuus heikkenee huomattavasti.

Astero ja Evens (2020, s. 4910) mallinsivat energiavaraston käyttöikää, määritelläkseen energiavarastolle hajoamiskustannuksen. Käyttöikä mallinnettiin erottelemalla ajanjaksot, jolloin energiavaraston kapasiteettia ladataan tai puretaan, sekä ajanjaksot, jolloin kapasiteetti pysyy vakiona. Näille ajanjaksoille laskettiin prosentuaaliset osuudet, joista pystyttiin laskemaan alkupääomakustannuksen jäännösarvon ja energiavaraston eliniän avulla energiavaraston heikkenemiskustannus. Eliniäksi määriteltiin ajanjakso, jolloin energiavaraston akustojen kapasiteetti heikkenee tietyn prosentuaalisen osuuden. Hajoamiskustannuksen avulla mallinnettiin energiavaraston optimoitua käyttöä.

Laitemyyjät käyttävät akkuenergian varastointijärjestelmistä nimitystä BESS (battery energy storage system), kertoo Mäkinen (T. Mäkinen, henkilökohtainen keskustelu,

9.12.2024) Vihreä Watti Oy:ltä. Yksi esimerkki Vihreä Watti Oy:n (n.d.) energiavarastosta on 3 086 kWh kapasiteetin energiakontti, jonka nimellisteho on 1 543 kW. Mäkinen (T. Mäkinen, henkilökohtainen keskustelu, 9.12.2024) arvioi energiakontin hinnaksi 1,4 milj. euroa (alv 0 %). Hinta on noin 453,7 €/kWh. Hinta sisältää energiakontin laitehankinnan hinnan eli siinä ei ole huomioitu maanrakennustöistä, kaapeloinneista, mahdollisten muuntajien hankinnasta, eikä muista mahdollisista lisätöistä koituvia kustannuksia. Astero ja Evens (2020, s. 4911) ovat tutkimuksensa perusteella määritelleet energiavarastojen pelkkien akkujen hinnaksi 200 €/kWh, mutta todenneet koko energiavaraston investoinnin hinnan olevan noin kaksinkertainen tähän verrattuna.

Energiavarastoja hallinnoi myös sähköautojen latausoperaattorit. Suurimpien sähköautojen latausasemien yhteydessä on yleensä itse latausaseman lisäksi akkuenergian varastointijärjestelmä, kertoo Koski (J. Koski, henkilökohtainen keskustelu, 3.6.2025) Virta Globalilta. Virta markkinoi yhtä MW:n tehon kokoluokan järjestelmää, joka koostuu sähköauton latausasemasta, sekä energiavarastosta. Koski kertoo, että latausaseman energiavarastoa käytetään kulutusjouston toteuttamiseen FCR-N-reservimarkkinalla. Koski arvioi energiavaraston hinnaksi 300 €/kWh ja muita asennukseen yms. liittyviä kuluja kertyvän 100 000–120 000 € asti. Osa pienemmistä Virta Glogalin (2025) tuotteista on varustettu V2G-teknologialla (vehicle-to-grid), joka reservimarkkinoille osallistuttaessa ottaa ylössäädössä tarvitsemansa virran auton akusta. Koski (J. Koski, henkilökohtainen keskustelu, 3.6.2025) kertoo, että Virta toimii toimittamiensa järjestelmien aggregaattorina.

4.2.3 Sähkökattilat

Yksi tapa osallistua reservimarkkinoille, on suuritehoiset sähkökattilat. Sähkökattiloissa sähköenergiaa kulutetaan vastuksella, joka varmistaa kustannustehokkaan ja kestävän ratkaisun. Toiminnan tehostamiseksi sähkökattilan yhteydessä on oltava varaajasäiliö, joka toimii eräänlaisena lämpöakkuna. Lämpöakkua voidaan ladata reservimarkkinoiden aktivoitumisen ja sähkön hinnan mukaan. Lämpöakku voidaan liittää kiinteistön

lämmitysverkostoon, ja siihen voidaan helposti kytkeä myös muista mahdollisista lämmönlähteistä lämmöntalteenottoja ja lämpöpumppuja. Ylilämmön poistoa varten myös esimerkiksi lauhduttimien lisääminen on mahdollista. Rajoitteena reservimarkkinoilla sähkökattiloiden osalta on, että niillä ei voida osallistua ylössäätöön. Tämä rajaa sähkökattilat ulos symmetrisiltä- ja ylössäätömarkkinoilta.

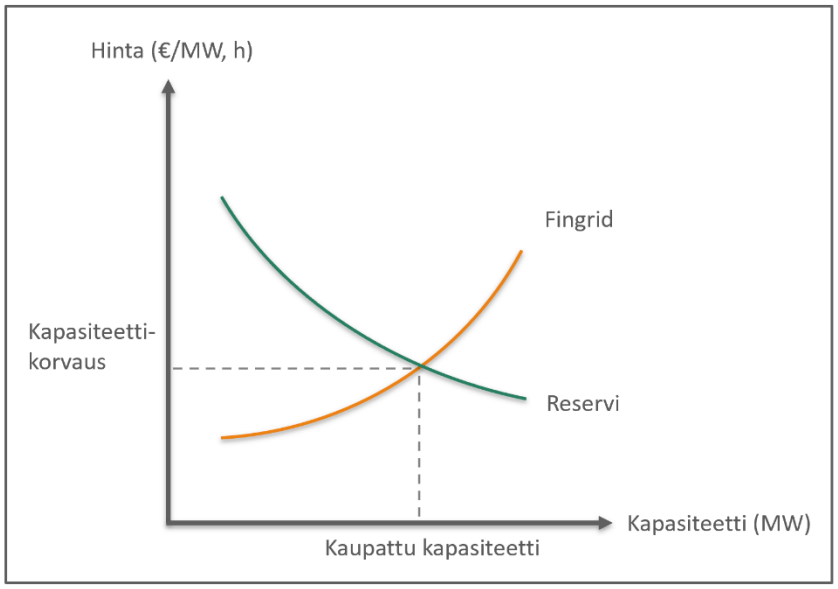
Sähkökattilan laskennallinen tekninen käyttöikä on 30 vuotta ja vastuksien 10–15 vuotta (Rakennustieto Oy, 2008). Sähkökattiloita markkinoivan Finessin edustaja Liimatainen (H. Liimatainen, henkilökohtainen keskustelu, 13.6.2025) kertoo, että FCR-markkinat eivät vaikuta merkittävästi sähkökattiloiden vastuksien käyttöikään. Vastukset on kytketty ryhmiin, jotka koostuvat virranrajoituksesta, kontaktorista ja vastuksesta. Ryhmien sähkötehot vaihtelevat kattilakoon mukaan, mutta yleensä ne ovat 100–400 kW. Automaation avulla vastusryhmät aktivoituvat vuorotellen, jolloin kuormitus jakaantuu tasaisesti ja vastuksien käyttöikää saadaan pidennettyä reservimarkkinakäytössä.

Liimatainen (H. Liimatainen, henkilökohtainen keskustelu, 13.6.2025) kertoo suuritehoisten sähkökattiloiden hintaluokaksi noin 90 000 € / MW. Pienillä kattiloilla hinta on huomattavasti korkeampi. Sähkökattiloiden kokoluokat vaihtelevat pienitehoisista, kiinteistöjen lämmitykseen tarkoitetuista alle 1,6 MW kattiloista, teollisuuden ja energialaitosten käyttöön tarkoitettuihin 15 MW kattiloihin. Markkinoilla on myös hybridikattiloita, joissa sähkövastuksien lisäksi on poltin polttoaineelle. Hybridikattiloiden ominaisuuksien ansiosta lämmöntuotanto ei kärsi reservimarkkinatoiminnasta. Polttoaineena toimivat kiinteät polttoaineet, kaasut ja öljyt. Hybridikattiloissa teho jakautuu tasan vastuksen ja polttimen välillä, esimerkiksi 5 MW vastus ja 5 MW poltin. Hybridikattiloiden ohjaus toimii automaatiolla, jolloin toiminta voidaan toteuttaa esimerkiksi sähkön hinnan mukaan. Hybridikattiloiden hinta on noin 35 % kalliimpi kuin tavallisten sähkökattiloiden, kun huomioidaan pelkkä kattilan hinta. Hybridikattila voidaan rakentaa konttiin, jolloin hinta 2 MW tehoiselle kokonaisuudelle on noin 650 000–670 000 €, lisäksi vielä savupiippu n.

15 000 €. Perusmalliseen konttitoimitukseen kuuluu kontti, syöttövesisäiliö, ulospuhallussäiliö, vedenkäsittelylaitteisto, kattilan sähköt ja ohjauskeskus sekä sähkötila kontissa.

4.3 Reservimarkkinoilta saatava taloudellinen hyöty

Motivan (2024b) Asiaa energiasta -webinaarissa Fingridin edustaja kertoo reservimarkkinoiden toimivan markkinaehtoisesti eli markkinoille jätettyjen tarjousten määrä ja hintataso vaikuttavat merkittävästi toteutuneisiin hintoihin. Kuviossa 10 on havainnollistettu, miten kapasiteettimarkkinoilla maksettava kapasiteettikorvaus muodostuu.



Kuvio 10. Kapasiteettikorvauksen muodostuminen (Grün, 2025).

Kuviosta 10 nähdään, että kun reserviä on vähän tarjolla markkinoilla, siitä voidaan pyytää kovempaa hintaa. Kun markkinoille tule enemmän kapasiteettia, hinnat alkavat laskea. Kun Fingrid tarvitsee vähän reserviä, heidän ei tarvitse maksaa kovin paljoa siitä. Vastaavasti, mitä enemmän reserviä tarvitaan, niin hinta alkaa nousemaan. Fingridin (2024a, Reservimarkkinat, Hankinta ja hinnoittelu) reservimarkkinoilla käytetään marginaalihinnoittelua eli tarjouksia hyväksytään hintajärjestyksessä niin kauan kunnes

hankintatarve saavutetaan. Kallein solmittu kauppa määrää hinnan kaikille samassa reservituotteessa, samaan markkina-aikaan sovituille kaupoille.

Fingridin edustaja kertoo Motivan (2024b) webinaarissa, kuinka mahdollisten säästöjen tai tuottojen laskeminen on vaikeaa. Fingridillä on velvoitteet hankkia tietty määrä reserviä vuoden aikana, mutta koska hinnat määräytyvät marginaalihinnoittelulla, niin lopullinen hinta on selvillä vasta sitten kun kaupat on tehty. Tällä hetkellä hankintaennusteet näyttävät, että hankintamäärät ovat lisääntymässä ja markkinoille hankitaankin jatkuvasti lisää toimijoita reserviin, jonka vuoksi tulevaisuuden hintatasoja on vaikea ennustaa. Reservimaksut maksetaan kerran kuukaudessa siten, että reservitoimittaja lähettää Fingridille laskun. Fingrid tarkastaa laskun, ja toteaa siinä esitetyt hinnat ja toteutuneiden säätöjen määrät oikeanmukaisiksi, ja maksaa laskun reservitoimittajalle.

Reservimarkkinoiden rahavirrat muodostuvat Fingridin (2024a, Reservimarkkinat, Liitteet, Reservimarkkinakoulutus 2024, s. 182, s. 187, s. 191) mukaan kapasiteettikorvauksista, energiamaksuista ja sanktioista. Kapasiteettikorvaus muodostuu ylläpidetyn kapasiteetin määrästä ja jokaiselle markkina-ajalle määräytyneestä kapasiteetin hinnasta. Energiamaksu taas muodostuu säätöenergiasta ja jokaiselle markkina-ajalle määräytyneestä energian hinnasta. Fingrid on määritellyt, että reservimarkkinoilla maksettavat kapasiteettikorvaukset lasketaan kaavan 1 mukaisesti, energiamaksut kaavan 2 mukaisesti ja säätöenergia kaavan 3 mukaisesti.

$$Kapasiteettikorvaus\ (€) = Ylläpidetty\ kapasiteetti\ (MW, h) \cdot Markkinahinta\ \left(\frac{€}{MW,h}\right) - Sanktiot\ (€) \quad (1)$$

$$Energiamaksu\ (€) = Säätöenergia\ (MWh) \cdot Energian\ hinta\ \left(\frac{€}{MWh}\right) \quad (2)$$

$$Säätöenergia\ (MWh) = Aktivoitu\ teho\ (MW) \cdot Aktivoinnin\ kesto\ (h) \quad (3)$$

Fingrid (2024a, Reservimarkkinat, Liitteet, Reservimarkkinakoulutus 2024, s. 187) on määritellyt sanktiot seurauksena toimittamatta jääneestä kapasiteetista. Jos todennettu kapasiteetti on vähemmän kuin toteutuneiden kauppojen summa tai vuosimarkkina-suunnitelma, niin tällöin kapasiteettikorvausta ei makseta toimittamasta jääneestä kapasiteetista. Sanktiot on määritelty laskettavaksi FCR- ja FFR-reservimarkkinoille kaavan 4 mukaisesti, ja aFRR- ja mFRR-reservimarkkinoille joko kaavalla 4 tai 5 siten, että suurempi lopputulos huomioidaan.

$$Sanktio\ (€) = Toimittamaton\ kapasiteetti\ (MW, h) \cdot 3 \cdot Markkinahinta\left(\frac{€}{MW,h}\right) \quad (4)$$

$$Sanktio\ (€) = Toimittamaton\ kapasiteetti\ (MW, h) \cdot Suomen\ tarjousalueen\ hinta\left(\frac{€}{MWh}\right) \quad (5)$$

Astero ja Evens (2020, s. 4908) ovat esittäneet tutkimuksessaan, että reservimarkkinoilta saatava tuotto energiavarastolla voidaan määritellä kaavan 6 mukaan.

$$Tuotto\ (€) = \sum_h \left(R_{cap,h} - P_{cap,h} + R_{eng,h} - C_{rec,h}\right) - \sum_m C_{trf,m} - C_d, \quad (6)$$

missä

$R_{cap,\,h}$	kapasiteettikorvaus markkina-ajan tunnilta
$P_{cap,\,h}$	sanktio markkina-ajan tunnilta
$R_{eng,\,h}$	energiamaksu markkina-ajan tunnilta
$C_{rec,\,h}$	energiavaraston palautumisen energiakustannus tunnilta
$C_{trf,\,m}$	verkkotariffin maksu kuukaudessa
C_d	energiavaraston heikentymiskustannukset tarkastelujaksolla

Kaavaa 6 voidaan soveltaa tapauskohtaisesti, kun energiavaraston palautumisen energiakustannukset korvataan tilannetta vastaavalla mahdollisella menekillä tai jätetään

vaihtoehtoisesti huomioimatta. Myös energiavaraston heikentymiskustannukset voidaan vaihtaa vastaamaan tarkasteltavan kohteen mukaista laitteen tai järjestelmän kulumista.

Fingrid (2025c) on kehittänyt sivuilleen reservituottolaskurin, jonka avulla voidaan hahmotella reservimarkkinoilta saatavia mahdollisia tuottoja. Laskurin perustana toimii toteutuneet tuntimarkkinahinnat kapasiteettimarkkinoilla. Laskuriin voidaan suodattaa markkinoita reservin säätönopeuden sekä säädön maksimikeston ja suunnan perusteella. Myös tarkasteltavaa aikaväliä ja keskimääräistä käyttöastetta voidaan muuttaa. Reservituottolaskuri näyttää markkinoilta saatavia potentiaalisia tuottoja eli se ei huomioi erilaisia kuluja ja tappioita. Näitä ovat esimerkiksi tarjouksen mahdollinen hylkääminen, sanktiot sekä järjestelmien kulumisesta tai energiankulutuksesta aiheutuvat kustannukset.

Yksi tapa tarkastella reservimarkkinoiden kannattavuutta on arvioida kauppojen toteutumisen todennäköisyyttä. Tarkastelu voidaan tehdä vertaamalla reservimarkkinoilla toteutuneiden kauppojen kapasiteettia markkinoille tarjotun kapasiteetin määrään. Kun toteutuneiden kauppojen keskimääräinen kapasiteetti jaetaan markkinoille tarjotulla keskimääräisellä kapasiteetilla, saadaan kauppojen syntyvyyden todennäköisyydelle prosentuaalinen arvo. On kuitenkin muistettava, että kauppojen syntyvyyteen vaikuttaa lopullisesti eniten tarjouksen hinta, alhaisimmat tarjoukset hyväksytään ensimmäisenä. Reservimarkkinoista löytyy kattavasti toteutunutta dataa Fingridin (2025b) sivuilta. Taulukossa 1 on esitetty reservimarkkinat, niillä syntyvien kauppojen todennäköisyydet, sekä hankintahinnan keskiarvo yksikössä tunnin aikana MW:n tehosta maksettu hinta. Hankintahinnoissa ei ole huomioitu energiamaksuja. Taulukossa on käytetty vuoden 2024 toteutunutta dataa.

Taulukko 1. Reservimarkkinoilla syntyvien kauppojen todennäköisyydet.

Reservi-markkina	**Toteutuneet kaupat markkinoilla (MW)**	**Markkinoille tarjottu kapasiteetti (MW)**	**Todennäköisyys kaupan toteutumisesta (%)**	**Hankintahinta (€/MW/h)**
FCR-N	60	121	49,6	45,83
FCR-D, ylös	60	175	34,3	18,54
FCR-D, alas	55	164	33,5	16,58
FFR	3	22	13,6	27
aFRR, ylös	59	94	62,8	26,21
aFRR, alas	56	176	31,2	23,48
mFRR, ylös	265	593	44,7	8
mFRR, alas	405	678	59,7	13

Taulukosta 1 nähdään, että todennäköisimmin kaupat syntyvät aFRR-ylös-markkinalla, jossa markkinoille tarjotusta 94 MW on hyväksytty 59 MW, eli 62,8 %. Toisena on mFRR-alas-markkina, 59,7 %, ja kolmantena FCR-N-markkina, 49,6 %. Parasta hintaa on kuitenkin maksettu FCR-N-markkinalla, josta keskimääräisesti, yhdelle tunnille kaupatusta MW:n tehosta, on maksettu 45,83 €. Toisena on FFR-markkina, jossa vastaavasti on maksettu 27 €/MW/h. mFRR-alas-markkinalla, jolla kauppojen syntyvyyden todennäköisyys oli toiseksi todennäköisintä, maksettiin kuitenkin toiseksi vähiten syntyneistä kaupoista, 13 €/MW/h. Tämän tarkastelun perusteella kannattavimmalta vaikuttavin markkina on FCR-N, korkeahkon todennäköisyyden ja hyvän hinnan ansiosta. Kannattamattomimmalta vaikuttavin markkina on tarkastelun perusteella FFR, vaikka siitä onkin maksettu toiseksi parasta hintaa. FFR-markkinalla on toteutunut vain 3 MW tehon edestä kauppoja vuoden 2024 aikana. Myös todennäköisyys kauppojen hyväksymiselle on ollut vain 13,6 %.

Kun todennäköisyydet kauppojen toteutumiselle reservimarkkinoilla on määritelty, kaava 6 saadaan sovellettavaan muotoon. Kaavassa 7 on esitetty, kuinka mahdollisia

vuosituottoja voidaan arvioida tarkemmin yleisellä tasolla. Kaava 6 on kuitenkin energiavaraston tuottopotentiaalin arvioimiseen tarkempi.

$$Vuosituotto\ (€) = Ylläpidetty\ kapasiteetti\ (MW) \cdot Hankintahinta\ \left(\frac{€}{MW,h}\right) \cdot Pysyvyys\ \left(\frac{h}{a}\right) \cdot Todennäköisyys\ (\%), \quad (7)$$

Taloudellista hyötyä analysoitaessa tärkeä näkökulma on laiteinvestointien takaisinmaksuajat. Asteron ja Evensin (2020, s. 4912–4914) tuloksien mukaan, Suomen FCR-N-reservimarkkinasäädösten mukaisen, 600 kWh kapasiteetin energiavaraston keskimääräiset vuosituotot olivat noin 38 000 €. Tällöin energiavaraston takaisinmaksuaika oli 6–8 vuotta ja energiavaraston elinikä noin 8 vuotta, kun akustojen kapasiteetti heikkeni 20 %. Taulukossa 2 tarkastellaan kappaleessa 4.2.2 käsitellyn Asteron ja Evensin tutkimuksen 600 kWh:n energiavaraston hankinnan takaisinmaksuaikaa kolmella selvitetyllä hinnalla kWh:n kapasiteettia kohden. Kun oletetaan vuotuisiksi tuotoiksi heidän määrittämänsä 38 000 €, päästään lähelle kyseisiä takaisinmaksuaikoja. Laskenta tehtiin kaavan 8 mukaisesti.

$$Takaisinmaksuaika\ (a) = \frac{Hinta\ \left(\frac{€}{kWh}\right) \cdot 600\ kWh + Muut\ kustannukset\ (€)}{Vuotuiset\ tuotot\ \left(\frac{€}{a}\right)} \quad (8)$$

Taulukko 2. 600 kWh energiavaraston takaisinmaksuajat eri kapasiteettihinnoilla.

Hinta (€/kWh)	Laitehankinta (€)	Muut kustannukset (€)	Hankintahinta (€)	Takaisinmaksuaika (a)
450	270 000	110 000	380 000	10,0
300	180 000	110 000	290 000	7,6
200	120 000	110 000	230 000	6,1

Taulukosta 2 voidaan todeta, että kalleimmalla hinnalla kWh:n kapasiteettia kohden ei saavuteta takaisinmaksuaikaa, energiavaraston akuston eliniän aikana. Keskimääräisellä kapasiteetin hinnalla takaisinmaksuaika saavutetaan juuri energiavaraston akuston

eliniän tullessa päätökseen. Alhaisimmalla hinnalla, jossa oli huomioitu vain energiavaraston akuston hinta, takaisinmaksuaika saavutetaan ennen kuin akuston elinikä tulee täyteen.

Ylilämmön poiston avulla sähkökattilan kapasiteettia voidaan tarjota reservimarkkinoilla vuoden jokaiselle tunnille. Jos tarkastellaan 1 MW:n tehoista sähkökattilaa FCR-D, alas -markkinalla, taulukossa 1 esitetyillä todennäköisyydellä ja hankintahinnalla sekä kaavalla 7, vuosituotoksi saadaan 48 655 €. Taulukossa 3 on esitetty 1 MW:n sähkökattilan takaisinmaksuaika kaavalla 8 laskettuna.

Taulukko 3. 1 MW:n sähkökattilan takaisinmaksuaika.

Laitehankinta (€)	**Vuotuiset tuotot (€/a)**	**Takaisinmaksuaika (a)**
90 000	48 655	1,8

Taulukossa 3 esitetty takaisinmaksuaika on kolmasosa verrattuna halvimpaan energiavarastoon. Takaisinmaksuaikaa tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitu vain sähkökattilan laitehankintahinta. Muita kustannuksia voi kertyä huomattavasti lisää, jos esimerkiksi kiinteistön sähkökeskus tai muuntaja eivät ole riittävän tehokkaita. Sama pätee tosin myös energiavarastoille.

5 Case-kohde

Kulutusjouston toteuttamista, reservimarkkinoita ja tuottojen muodostumista tarkasteltiin edellisissä luvuissa. Jotta saadaan käsitystä todellisesta jouston potentiaalista, niin kannattavinta on tehdä tarkastelu oikeaan, olemassa olevaan kiinteistöön. Kuten edellisissä luvuissa on jo todettu, reservimarkkinoille mukaan pääseminen vaatii suuria sähkötehoja. Tämän takia case-kohteen valintaan vaikutti erityisesti kiinteistön kokoluokka ja käyttötarkoitus.

Tutkimuksen case-kohde on suuri teollisuuskiinteistö, pinta-alaltaan noin 60 000 m^2. Kiinteistö tuottaa päivittäisen toimintansa oheistuotteena sähköä ja lämpöä. Sähkö ja lämpö hyödynnetään ensisijaisesti kiinteistön omassa käytössä. Ylimääräinen sähköenergia myydään takaisin verkkoon tai kulutetaan erillisillä sähkövastuksilla. Ylimääräistä lämpöenergiaa varten kiinteistössä on lauhdutus. Kiinteistön koon vuoksi sähköenergia ostetaan kiinteällä hinnalla, kappaleessa 3.2 esitellyiltä fyysisiltä tukkumarkkinoilta. Käytössä ei ole pörssisähkösopimusta, joka asettaa omia rajauksiaan tutkimustyölle. Kohteen osalta ei siis tarkastella implisiittistä vaan eksplisiittistä kulutusjoustoa. Tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella kiinteistön taloteknisten järjestelmien joustopotentiaalia ja soveltuvuutta reservimarkkinoille sekä arvioida erilaisten investointien kannattavuutta ja tuottoja.

5.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen tarkoituksena oli määritellä teollisuuskiinteistön talotekniikan kulutusjouston potentiaali ja arvioida investointien kannattavuutta. Lähtökohtana oli selvittää ja arvioida, onko kiinteistön talotekniikalla mahdollista osallistua reservimarkkinoille. Tutkimuksen alussa haastavaa oli niukka ymmärrys kulutusjoustosta ja reservimarkkinoista. Teoriakatsauksen pohjalta selkeni mitä aineistoja tutkimuksessa tullaan tarvitsemaan ja kuinka tutkimus tullaan toteuttamaan.

5.1.1 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

Nykyaikaisen kiinteistöjen hallinnan keskeisin työkalu on pilvipohjainen kiinteistöjohtamisen ohjelmisto, esimerkiksi Granlund Manager (2024b). Tehostetussa kiinteistönjohtamisessa kaikki kiinteistöjen tiedot ovat saatavilla samasta paikasta. Erilaisia kiinteistöjohtamisen osa-alueita ovat muun muassa säännöllisesti toistuvat kiinteistöhuollot, ennakoiva kunnossapito, ylläpitokustannuksia madaltava tavoitteellinen energianhallinta, toimiva energian kulutusten mittaus ja raportointi. Granlund Manageriin pystytään lisäksi rakentamaan kiinteistön tekninen puu, johon järjestelmien laitteiden ja komponenttien tiedot saadaan syötettyä. Käytössä on myös dokumenttien hallinta eli ajantasaiset suunnitelmat, ja rakennuksen huoltokirja ovat kaikki samassa paikassa. Kiinteistöjohtamisen työkalun tärkeä ominaisuus on sujuva datan liikkuminen ohjelmistojen välillä eli integraatio.

Tutkimuksen aineisto kerättiin rakennusaikaisista suunnitelmista, kohteen sähköenergian kulutusta mittaavasta pilvipalvelusta sekä Granlund Manager -asiakkuudesta. Kiinteistön sähköenergian kulutusta mittaavasta pilvipalvelusta haettiin VJK:iden sähköenergian kulutuksen data. Hyödynnettäviä suunnitelmia olivat lämmityksen, jäähdytyksen ja energiankierrätyksen kytkentäkaaviot, LVI-laiteluettelot ja energiakeskuksen järjestelmäkaavio. Sähköenergian kulutuksen osalta käytettiin kohteeseen ostetun, ja kohteesta sähköverkkoon myydyn sähköenergian tuntidataa. Granlund Managerista haettiin luettelo kohteen valaisimista. Reservimarkkinoita käsittelevä aineisto koostui samoista materiaaleista, joita tarkasteltiin kappaleissa 3.3 ja 4.1. Materiaali on saatavilla Fingridin sivuilla. Laiteinvestointeja käsittelevä materiaali kerättiin eri laitteita markkinoivilta yrityksiltä.

Diplomityön tutkimusmenetelmänä käytetään kvantitatiivista tutkimusta. Kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä on selkeä valinta, koska tutkimuksessa käsitellään suuria määriä materiaalia. Tutkimuksessa analysoidaan muun muassa vuoden ajalta kiinteistön sähköenergian tuntikulutuksen dataa. Myös kiinteistön talotekniikan sähkötehot ovat

listattuna luetteloihin. Tutkimuksessa käytettävä aineisto kerätään asiakkaalta, asiakkaan käyttämistä kiinteistön kulutusten seurannan ja suunnitelmallisen kiinteistönpidon pilvipalveluista. Aineisto kerätään järjestelmistä ja analysoidaan tilastollisten menetelmien avulla.

5.1.2 Tutkimuksen valmistelu

Tutkimus aloitettiin selvittämällä rakennuksen lämmityksen, jäähdytyksen, ilmanvaihdon ja valaistuksen joustopotentiaalit. Joustopotentiaalin selvityksessä tarkoituksena oli huomioida nykyinen tekniikka, ja arvioida sen soveltuvuutta ja mahdollista optimointipotentiaalia. Tällöin kiinteistön todellista joustopotentiaalia tultiin arvioimaan kokonaisuutena, sekä pohtimaan esimerkiksi tehopiikkien hallintaa. Lopuksi tarkoituksena oli kartoittaa lisäinvestointimahdollisuudet ja arvioitiin näiden tuottavuutta.

Tutkimuksen valmistelut aloitettiin keräämällä tarvittavat lähtötietomateriaalit ja -aineistot. Materiaalien ja aineistojen pohjalta tutkimuksen toteutusta lähdettiin suunnittelemaan. Tarvittavien materiaalien avulla järjestelmien sähkötehojen laskenta ja raportointi päästiin aloittamaan. Kiinteistön tekniikkaan ja järjestelmiin tutustuttiin olemassa olevien järjestelmäkaavioiden ja laiteluetteloiden kautta. Näin kokonaiskuva kiinteistön järjestelmien toiminnasta hahmotettiin. Kun ymmärrys kiinteistön tekniikasta oli muodostettu, pystyttiin pohtimaan mistä kaikesta kiinteistön sähkönkulutuksessa voidaan tarvittaessa joustaa.

Energiakierrätyksen järjestelmäkaaviosta määriteltiin lämmityksen ja jäähdytyksen järjestelmien rakenteet. Tärkeää oli selvittää erityisesti jäähdytysjärjestelmien osalta, kuinka niiden toiminnan säätäminen tulisi vaikuttamaan kiinteistön toimintaan. LVI-laiteluetteloista selvitettiin laitteiden määrät, palvelualueet ja sähkötehot. Granlund Managerista haetusta valaisinluettelosta selvitettiin valaisimien ohjauksen tekniikka, palvelualue, lukumäärä positiota kohden sekä sähköteho. Järjestelmäkokonaisuudet kirjattiin Excel-taulukkoon ja niiden sähkötehot laskettiin yhteen.

Järjestelmäkokonaisuuksista arvioitiin, mistä laitteista voidaan joustaa pidempiä aikoja vapaammin ja mitkä voidaan sammuttaa hetkellisesti. Samalla rajattiin pois tarkastelusta myös järjestelmät, joihin ei voida kohdistaa toimenpiteitä. Järjestelmäkokonaisuuksia, joista voidaan joustaa vapaammin, ovat sellaiset tilat, joiden olosuhteiden muutoksesta ei seuraa mitään kriittistä. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi toimistotilat, neuvotteluhuoneet, käytävät, porrashuoneet jne. Järjestelmäkokonaisuuksissa, joissa ei voida joustaa, olosuhteiden on pysyttävä tietyissä arvoissa kiinteistön toiminnan häiriöttömän jatkumisen kannalta. Näitä tiloja ovat esim. sähkötilat ja prosessiin vaikuttavat komponentit.

5.2 Kiinteistön talotekniset järjestelmät

Kiinteistön lämmitys on toteutettu pääasiassa kaukolämmöllä, ja 300 m^3 lämpöakulla. Lämpöakkua lämmitetään prosessin hukkalämmöllä. Rakennuksen prosessitilat on varustettu erillisillä lämmöntalteenottoyksiköillä. Lämmönsiirtimien mitoituksen lämpöteho on yhteensä 41 MW. Lisäksi kiinteistön paineilmasta otetaan 550 kW lämpöenergiaa talteen ilmakompressorien jäähdytyksellä. Paineilmasta talteen otettua lämpötehoa tehostetaan lämpöpumpulla. Prosessitilojen lämmönsiirtimet ja lämpöpumppu ovat kytketty lämpöakkuun, josta lämmitysenergia johdetaan lämmönsiirtimen kautta lämmitysverkostoille. Kiinteistön lämmityksen toiminta selvitettiin energiankierrätyksen järjestelmä- ja kytkentäkaavioista.

Jäähdytystä varten kiinteistössä on kaksi vesistölämmönsiirrintä sekä viisi rinnan toimivaa VJK:ta. Vesistölämmönsiirtimet ja VJK:t ovat kytketty neljään puskurisäiliöön, joiden tilavuus on yhteensä 20 m^3. Vesistölämmönsiirtimien mitoitettu lauhdutusteho on yhteensä 15 MW. VJK:t ovat keskenään identtisiä. Yhden koneen jäähdytysteho on 1 600 kW. Kiinteistön sähkö- ja elektroniikkatilojen jäähdytystehontarve on 3 825 kW, prosessitilojen 4 125 kW, toimiston 1 180 kW ja muiden tilojen 3 200 kW. Jäähdytyksen toiminta selvitettiin energiankierrätyksen järjestelmäkaaviosta ja jäähdytyksen kytkentäkaaviosta.

Rakennuksen ilmanvaihto koostuu 45 osajärjestelmästä. Osajärjestelmiin kuuluu erilaisia tiloja prosessitiloista, tutkimustiloista, teollisista tiloista, logistiikasta, teknisistä tiloista ja toimistotiloista. Suurin osa ilmanvaihtokoneista on suuria modulaarisia ilmanvaihtokoneita, mutta kiinteistössä on myös muutamia pienempiä pakettikoneita. Ilmanvaihdon tiedot selvitettiin LVI-laiteluettelosta. LVI-laiteluettelossa jokaisen osajärjestelmän alle on listattu osajärjestelmään kuuluvat laitteet ja komponentit.

Rakennuksen valaistus on suurimmalta osin toteutettu DALI-ohjauksella (noin 70 %). DALI-ohjattavia positioita rakennuksessa on yhteensä 115. Toiseksi eniten valaistusta ohjataan ns. on/off-periaatteella. Näitä positioita on yhteensä 45. Kahdessa positiossa on käytössä KNX-ohjaus. Yhdellä positiolla voi olla satoja samanlaisia valaisimia. Valaistuksen tiedot selvitettiin valaisinluettelosta. Kaikkien positioiden valaisimien lukumääriä tai sähkötehoja ei ollut merkitty valaisinluetteloon.

6 Tulokset

Case-kohteen tutkimuksen tuloksina saatiin taloteknisten järjestelmien sähkötehoille potentiaalit kulutusjoustoon osallistuttaessa. Tuottopotentiaalia arvioitaessa tuli määrittää joustoille kestot, kuinka monelle tunnille kulutusjoustoa voidaan vuoden aikana tarjota. Kulutusjouston kestojen pituudet määriteltiin tilojen käyttöasteen ja -tarkoituksen mukaan. Huomioimalla tilojen käyttöajat ja -tarkoitukset, jouston kesto pystyttiin nostamaan mahdollisimman korkealle ilman, että olosuhteet ja toiminta kärsivät.

Tulosten kannalta jouston kapasiteetilla on olennaisin merkitys, kun markkinoille pyritään mukaan. Jouston kesto taas on merkittävässä roolissa, kun arvioidaan tuottojen potentiaalia. Tuottoja arvioitaessa vaikuttaa myös paljon, kuinka kauppojen hyväksyminen huomioidaan laskelmissa.

6.1 Järjestelmien joustopotentiaalit

Lämmitysjärjestelmien osalta kulutusjouston potentiaalia arvioitaessa huomioitiin lämpöpumppu. Lämpöpumpun sähköteho on 164 kW. Lämpöpumpun lämpöteho, 550 kW, on pieni suhteessa rakennuksen kokoon. Lämmitystä voidaan tarvittaessa paikata kaukolämmöllä. Myös lämpöakkuun voidaan varastoida lämpöä ennakkoon. Tämän vuoksi sähköteho voidaan hyödyntää kokonaisuudessaan, ja joustoa tarjota vuorokauden jokaiselle tunnille. Joustopotentiaali on saatavilla sekunneissa koko vuoden ajan.

Jäähdytysjärjestelmien osalta joustopotentiaalin arvioimisessa huomioitiin VJK:t. Yhden VJK:n sähköteho on 277 kW. VJK:t ovat merkittävässä roolissa prosessin toiminnan kannalta, jonka vuoksi kulutusjoustossa niitä voidaan hyödyntää harkiten. Tutkimuksessa oletettiin kolmen VJK:n palvelevan sähkö- ja tehoelektroniikkatiloja, ja kahden koneen muita tiloja. VJK:iden kausittaisen energiatehokkuuden suhdeluku, eli SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) on 6,37.

VJK:ihin kytkettyjen puskurisäiliöiden tilavuuden ollessa 20 m^3, 5 °C lämpötilaerolla säiliöihin mahtuu yhteensä 420 kWh jäähdytysenergiaa kerralla. Kulutusdatasta nähtiin, että VJK:iden sähköenergiantarve on jäähdytyskaudellaan enimmillään 415 kWh vuorokauden aikana. Tällöin vuorokauden aikana tarvittu jäähdytysenergia on noin 2,65 MWh vuorokaudessa. Puskurisäiliöihin mahtuu siis 16 % vuorokauden jäähdytysenergian tarpeesta. Puskurisäiliöiden ja vesistölauhduttimien ansiosta tutkimuksessa oletettiin, että kaikkia VJK:ita voidaan joustaa yhtä aikaa 30 minuuttia kerrallaan. Vastaavasti kolmea konetta voidaan joustaa 10 tuntia ja kahta konetta 16 tuntia. Tämä tarkoitta hetkellisesti 1 385 kW joustoa, keskipitkällä aikavälillä 831 kW joustoa ja pitkällä aikavälillä 554 kW. Jäähdytyksen joustopotentiaali on kausiluontoista, ja potentiaali painottuu kesäaikaan.

Rakennuksen ilmanvaihdon laitteista ja komponenteista huomioitiin kulutusjouston potentiaalin arvioinnissa puhaltimet, sähköpatterit, pyörivien LTO-laitteiden moottorit, pakettikoneet sekä lämmityspattereiden pumput. 45 ilmanvaihdon osajärjestelmää jaoteltiin tilojen käyttötarkoituksen mukaan olosuhdekriittisiin tiloihin ja valikoituihin osiin. Olosuhdekriittisiä tiloja ovat tehoelektroniikka- ja muuntajatilat. Prosessitiloissa ilmanvaihto on tarpeen mukainen, eikä sitä voida rajoittaa. Nämä tilat käsittävät yhteensä 20 osajärjestelmää, joista ei voida joustaa. Valikoituja osia ovat muut kuin olosuhdekriittiset tilat. Nämä sisältävät kohdepoistot, tekniset tilat, ylilämmön poistot, ATEX-tilat ja sprinklerirakennuksen. Valikoituja osia ja teollisuustoimintaa käsittelevien tilojen ilmanvaihtoa tarkasteltiin kriittisesti.

Ilmanvaihdon osajärjestelmistä 11 voidaan joustaa vapaammin pitempiä aikoja. Näihin 11 osajärjestelmään kuuluu toimistotiloja, neuvotteluhuoneita, logistiikan tiloja, käytäviä ja porrashuoneita. Teollisuustoiminnan tiloissa ilmanvaihtoa voidaan rajoittaa puoliteholle. Aiemmin teollisuustoiminnan tiloissa on ilmennyt ongelmia materiaalien laadussa, kun ilmanvaihdon käyntiaikoja on muutettu. Tällöin ilmanvaihto sammutettiin kokonaan yöksi. Pitkän aikavälin jouston kestoksi määriteltiin 24 tuntia ja jouston määrä 281 kW.

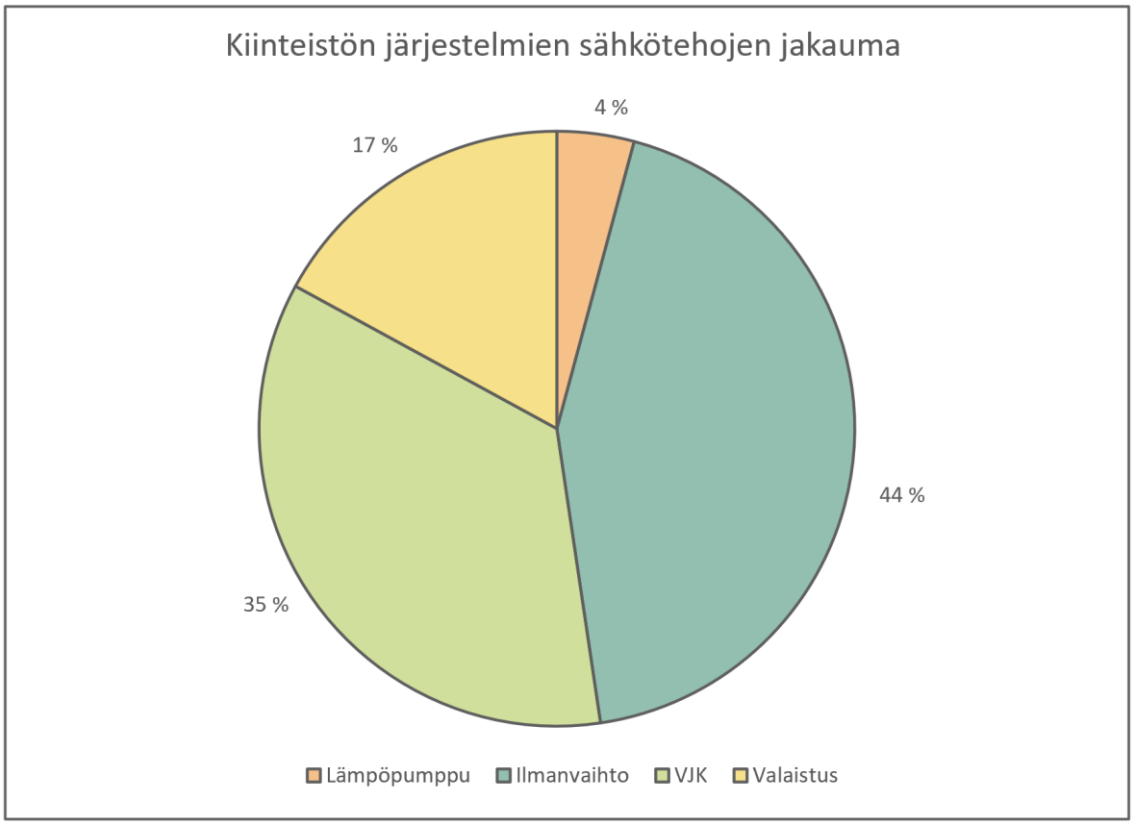
Keskipitkällä aikavälillä voidaan joustaa ilmanvaihdon 25 osajärjestelmää. Näihin osajärjestelmiin kuuluvat samat tilat, kuin pidempiaikaiseen joustoon. Erona on, että teollisissa tiloissa ilmanvaihtoa voidaan joustaa täydellä teholla. Mukaan on myös laskettu tutkimustiloja, sprinkler-rakennus, kompressoritila, jätehuoltotiloja, hissikuiluja ja muita lisätiloja (auxiliaries). Näistä osajärjestelmistä on rajattu pois ATEX-tilat ja kohdepoistot. Keskipitkän aikavälin jouston pituudeksi määriteltiin 1 tunti ja jouston määräksi 692 kW. Hetkellisesti voidaan joustaa samoja osajärjestelmiä kuin keskipitkällä aikavälillä. Hetkelliseen joustoon on kuitenkin laskettu mukaan myös ATEX-tilat ja kohdepoistot. Rakennuksen ilmanvaihdosta voidaan hetkellisesti joustaa noin 746 kW. Hetkellisen jouston pituudeksi määriteltiin 10 minuuttia.

Kulutusjouston potentiaalia arvioitaessa valaistuksen osalta, joustavat osuudet määriteltiin valaistuksen positioiden avulla. Positiot jaoteltiin sen mukaan, mistä voidaan joustaa vapaammin pitempiä aikoja, mistä voidaan joustaa hetkellisesti ja mistä ei voida joustaa. Turva- ja opastevalaisimet rajattiin kokonaan ulos tarkastelusta. DALI-ohjauksella toimivista positioista voidaan hetkellisesti himmentää 80 % teknisistä tiloista ja 20 % muista tiloista. Tämä tarkoitta noin 220 kW joustoa. Hetkelliseksi jouston kestoksi arvioitiin 30 minuuttia. Keskipitkällä aikavälillä voidaan himmentää 20 % kaikista DALI-ohjauksella toimivista positioista. Keskipitkän jouston kestoksi arvioitiin 12 tuntia. Jouston määrä on keskipitkällä aikavälillä noin 130 kW. Pitkän aikavälin joustossa voidaan himmentää 20 % valikoiduista DALI-ohjatuista positioista. Valikoidut positiot käsittävät kaikki muut paitsi teollisuus-, tuotanto- ja tutkimustilat. Pitkän aikavälin jouston kestoksi määriteltiin 24 tuntia. Joustopotentiaali on noin 60 kW. Kiinteistön taloteknisten järjestelmien kulutusjouston potentiaalit ja joustojen kestot vuorokauden aikana on esitetty koostetusti taulukossa 4.

Taulukko 4. Taloteknisten järjestelmien joustopotentiaalit ja jouston kestot.

Järjestelmä	Hetkellinen	Keskipitkä	Pitkä
Lämmitys	164 kW / 24 h	164 kW / 24 h	164 kW / 24 h
Jäähdytys	1 385 kW / 30 min	831 kW / 10 h	554 kW / 16 h
Ilmanvaihto	746 kW / 10 min	692 kW / 1 h	281 kW / 24 h
Valaistus	220 kW / 30 min	130 kW / 12 h	60 kW / 24 h

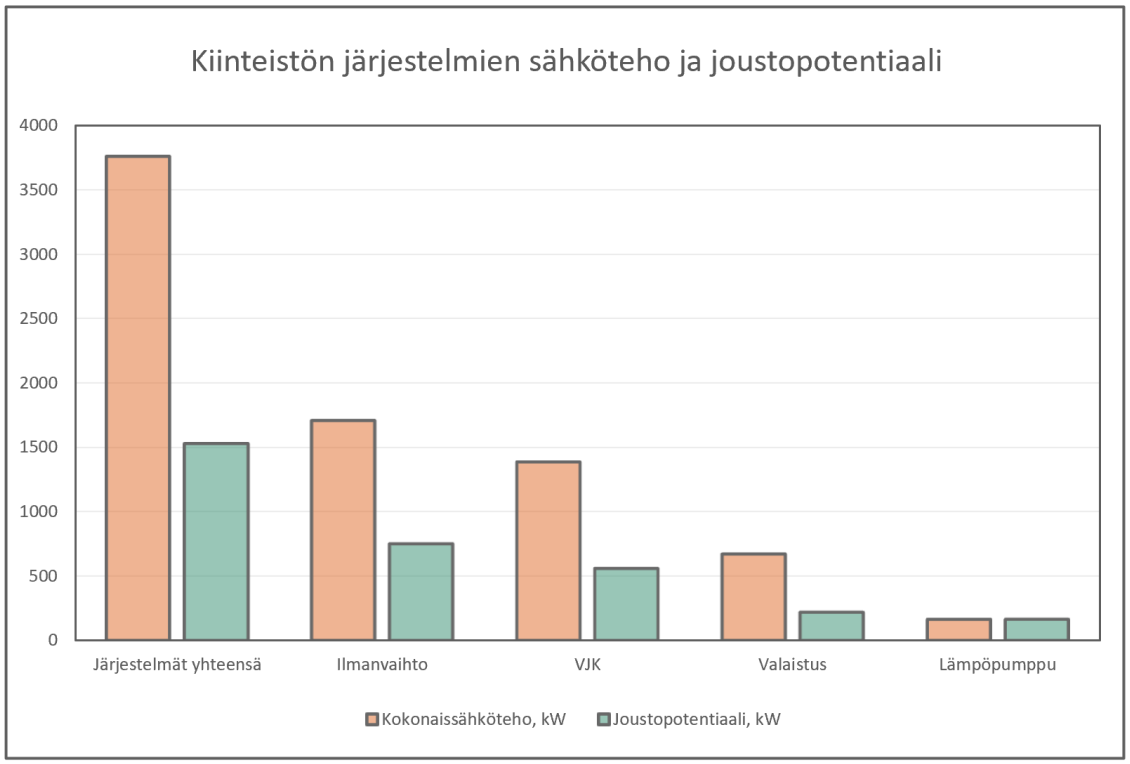
Taloteknisten järjestelmien sähköteho on yhteensä noin 3 924 kW. Tästä 164 kW kuuluu lämpöpumppuun, 1 358 kW VJK:ihin, 1 706 kW ilmanvaihtoon ja 669 kW valaistukseen. Sähkötehojen jakauma järjestelmien välillä on esitetty kuviossa 11.



Kuvio 11. Kiinteistön järjestelmien sähkötehojen jakauma.

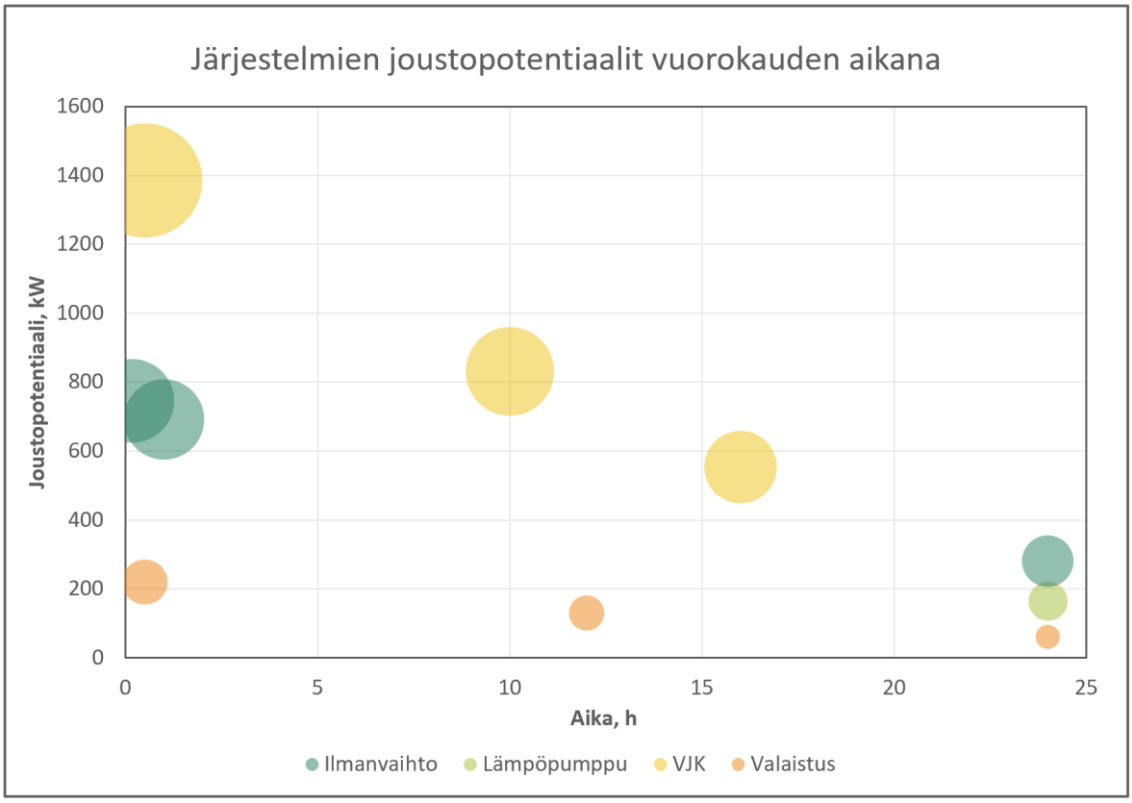
Kuviosta 11 nähdään, kuinka suurimmat sähkötehot kiinteistössä on ilmanvaihdossa. Ilmanvaihtojärjestelmien sähkötehot kattavat 44 % koko kiinteistön sähkötehosta. Toisena

ovat VJK:t, joiden sähkötehot ovat 35 % koko sähkötehosta. Kolmantena on valaistus, 17 % koko sähköteosta, ja viimeisenä lämpöpumppu, 4 % sähkötehosta. Järjestelmien sähkötehojen jakauma heijastuu myös joustopotentiaaleihin, jotka on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12. Kiinteistön järjestelmien sähköteho ja joustopotentiaali.

Kuviossa 12 on ensimmäisenä vasemmalla koko rakennuksen sähköteho, 3 924 kW, josta joustopotentiaalia on 1 594 kW. Koko rakennuksen järjestelmien yhteenlasketusta sähkötehosta voidaan joustaa siis alle puolet. Rakennuksen koko ilmanvaihdon sähköteho on yhteensä noin 1 706 kW, josta joustopotentiaalia on noin 746 kW. Toisena olevien VJK:iden yhteenlaskettu sähköteho on 1 358 kW. Tästä voidaan joustaa 554 kW. Kolmantena on valaistus, jonka sähköteho on noin 669 kW. Valaistuksesta voidaan joustaa noin 220 kW. Viimeisenä on lämpöpumppu, jonka sähköteho ja joustopotentiaali ovat 164 kW. Kuviossa 13 on esitetty, kuinka järjestelmien joustopotentiaalit jakautuvat vuorokauden tunneille.



Kuvio 13. Järjestelmien joustopotentiaalit vuorokauden aikana.

Kuviossa 13 on esitetty, kuinka monelle yhtäjaksoiselle tunnille joustopotentiaalia voidaan tarjota. Suurin joustopotentiaali on VJK:issa. Näiden osalta tulee kuitenkin huomioida, että joustopotentiaali ei ole saavutettavissa ympäri vuoden. Pitkäkestoisin yhtäjaksoinen joustopotentiaali on ilmanvaihdossa ja valaistuksessa. Pienin joustopotentiaali on lämpöpumpulla.

6.2 Reservimarkkinoiden soveltuvuus

Ideana talotekniikan kulutusjoustossa on, että osallistuttaisiin reservimarkkinoilla pääosin kappaleessa 3.3 selitettyyn ylössäätöön. Ylössäätöön osallistuttaisiin rajoittamalla tekniikan toimintaa, jolloin sähköenergian kulutusta vähennetään. Ylössäätöä voidaan toteuttaa kappaleessa 2.2 käsitellyillä kulutusjouston malleilla ja toteutustavoilla.

Tutkimuskohteessa tarkasteltiin eksplisiittistä kulutusjoustoa, johon kuuluvat kaikki toteutusmallit.

Lämpöpumpulla voidaan periaatteessa osallistua sekä ylös- että alassäätöön. Lämpöpumpun osalta kulutusjoustomalleista toteutuu ylössäädössä joustava kuorman muotoilu. Joustavaan kuorman muotoiluun kuuluu kaikki kulutusjouston toteutusmallit. Lämpöpumpun toiminnassa tämä näkyy niin, että ylössäädössä kulutusta vähennetään, optimoidaan tai siirretään. Alassäädössä kulutusjoustomalleista toteutuvat notkon täyttäminen tai kuorman siirtäminen. Tällöin siis notkon täytössä kulutusta optimoidaan, tai kuorman siirrossa kulutusta siirretään. Käytännössä tämä näkyisi esimerkiksi siten, että lämpöä ajetaan varastoon lämpöakkuihin. Tutkimuskohteen lämpöpumpun toimintaa reservimarkkinoilla rajoittaa sen sähköteho. Sähköteho riittää teoriassa vain juuri FCR-N-markkinalle mukaan pääsyyn. Ylössäädössä lämpöpumpun osalta on huomioitava, että lämpöpumpun tulee olla jo päällä, kun reservi aktivoituu. Vain tällöin jousto oikeasti toteutuisi.

VJK:illa voidaan myös osallistua sekä ylös-, että alassäätöön. Kuten lämpöpumpulla, VJK:illakin toteutuu ylössäädössä joustava kuorman muotoilu. Tällöin VJK:iden kulutusta vähennetään, optimoidaan tai siirretään. Myös alassäädössä toteutuvat notkon täyttäminen tai kuorman siirtäminen. Toiminnassa VJK:iden ylös- ja alassäädöt näkyvät samantapaisesti kuin lämpöpumpulla. Jäähdytysenergiaa varastoidaan puskurisäiliöihin tai vaihtoehtoisesti käytetään sieltä, kun koneet sammutetaan. Myös VJK:illa reservimarkkinoille osallistumista rajoittaa sähköteho, mutta lisäksi myös kulutusjouston kesto. Hetkellisessä joustossa sähköteho riittäisi teoriassa muillekin markkinoille, kuin FCR-N:lle, mutta rajoitteena on tässä arvioitu jouston kesto 30 minuuttia. Pidemmän aikavälin joustoilla määritelty sähköteho ei ole riittävä muuhun kuin FCR-N-markkinaan. Kuten myös lämpöpumpulla, VJK:iden tulee olla jo päällä, kun ylössäädön reservi aktivoituu. Rajoitteena on lisäksi vielä käyttöaikojen painottuminen jäähdytyskaudelle.

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmillä ja valaistuksella voidaan osallistua vain ylössäätöön. Molemmilla järjestelmillä toteutuu ylössäädössä huipun leikkauksen ja kuorman siirtämisen kulutusjoustomallit. Käytännössä kulutusjoustomallit toteutuvat niin, että reservin aktivoituessa järjestelmien tehoja rajoitetaan. Reservimarkkinoille osallistumista rajoittavat järjestelmien sähkötehot ja kykenemättömyys alassäätöön. Teoriassa tehot riittävät vain FCR-N-markkinalle, mutta koska FCR-N on symmetrinen markkina, ei kumpikaan järjestelmä sovellu kunnolla siihen.

Järjestelmien soveltuvuuksia eri reservimarkkinoille vertailtiin laskemalla potentiaaliset vuosituotot kappaleessa 4.3 esitetyllä kaavalla 7. Kaavan 7 avulla laskettiin eri pituisille joustoille, ja näiden tehoille, potentiaaliset vuosituotot niillä markkinoilla, joihin ne teoriassa sopivat. Taulukossa 5 on esitetty järjestelmäkohtaisesti, millä joustopotentiaalilla ja aktivoinnin kestolla, suurimmat vuosituotot saavutetaan. Kaikki järjestelmät ovat FCR-N-markkinassa, koska sähkötehot tai jouston kesto eivät olleet riittäviä muihin. Hankintahinta ja kauppojen muodostumisen todennäköisyys ovat määritelty kappaleessa 4.3 taulukossa 1, ja ne ovat kaikille samat, 45,83 € ja 49,6 %.

Taulukko 5. Kulutusjouston tuottopotentiaali FCR-N-reservimarkkinalla.

Järjestelmä	Kapasiteetti (kW)	Pysyvyys (h/a)	Arvioitu vuosituotto (€)
Lämpöpumppu	164	4 380	16 324
VJK:t	554	1 968	24 777
Ilmanvaihto	281	4 380	27 970
Valaistus	130	2 190	6 470

Taulukossa 5 on esitetty kiinteistön taloteknisten järjestelmien kulutusjouston vuotuiset tuottopotentiaalit FCR-N-reservimarkkinalla. Järjestelmien pysyvyyden kuvastavat sitä, kuinka monelle tunnille vuoden aikana joustoa voidaan tarjota. Lämpöpumpun pysyvyys määritettiin siten, että vuoden tunnit jaettiin puolella. Tämä siitä syystä, että lämpöpumpulle ei ole oikeastaan käyttöä jäähdytyskaudella. VJK:iden pysyvyys määriteltiin jäähdytyskauden mukaan. VJK:ita voidaan joustaa kerran vuorokaudessa 16 tuntia

jäähdytyskaudella. Laskettiin yhteen touko-, kesä-, heinä- ja elokuun päivät, ja kerrottiin nämä joustavilla tunneilla. Myös ilmanvaihdon pysyvyydeksi määriteltiin puolet vuoden tunneista, koska järjestelmistä on karsittu kaikki kriittiset osat pois. Valaistuksen pysyvyydeksi määriteltiin neljäsosa vuoden tunneista, koska päiväsaikaan ja kesäisin valaistusta tuskin käytetään täydellä teholla.

Taulukon 5 arvioiduista vuosituotoista nähdään, että suurin potentiaali on ilmanvaihdossa, vaikka VJK:issa onkin melkein kaksinkertainen määrä sähkötehoa. Vähiten potentiaalia on valaistuksessa. Lämpöpumpun potentiaali on noin 10 000 € enemmän, kuin valaistuksen, vaikka sähkötehot ovat lähes samat. Valaistuksen ja VJK:iden pysyvyydet taas ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta niiden tuottopotentiaaleissa on merkittävät erot.

Jotta muitakin markkinoita pystyttiin arvioimaan, tarkastelu tehtiin myös jouston keston mukaan. Tällöin tarkastelussa kapasiteettiin on laskettu kaikkien järjestelmien sähkötehot yhteen jouston keston mukaan. Kapasiteetit laskettiin hetkelliselle, keskipitkälle ja pitkälle jouston kestolle. Todennäköisesti kaikkia järjestelmiä ei kuitenkaan voida joustaa samanaikaisesti. Tuottojen potentiaalia arvioitaessa samanaikaistaminen on huomioitu 0,6-kertoimella. Hankintahinnoissa ei ole huomioitu energiamaksuja. Pysyvyydet on arvioitu niin, että hetkellistä joustoa voidaan tarjota kerran vuorokaudessa vuoden ajan. Keskipitkää joustoa voidaan tarjota kaksi kertaa vuorokaudessa vuoden ajan. Pitkän aikavälin jouston kestoa rajoittavat VJK:t. Tällöin kulutusjousto ajoittuu jäähdytyskaudelle, eli touko-elokuulle. Joustoa voidaan tarjota joka päivä, 123 vuorokauden ajan, jolloin pysyvyydeksi saadaan 1 968 h.

Arvio vuosituotoista laskettiin kappaleessa 4.3 esitetyn kaavan 7 mukaan. Hankintahinta ja kauppojen muodostumisen todennäköisyys ovat määritelty myös kappaleessa 4.3 taulukossa 1. Arvioidut vuosituotot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Kulutusjouston tuottopotentiaali jouston keston mukaan.

Jouston kesto	Kapasiteetti (MW)	Reservi-markkina	Hankinta-hinta (€)	Pysyvyys (h/a)	Todennäköi-syys (%)	Arvioitu vuo-situotto (€)
Hetkellinen	2,5	FFR	27	365	13,6	2 010
Keskipitkä	1,8	FCR-N	45,83	730	49,6	17 922
Keskipitkä	1,8	aFRR ylös	26,21	730	62,8	12 977
Pitkä	1,1	FCR-N	45,83	1 968	49,6	29 526
Pitkä	1,1	FCR-D ylös	18,54	1 968	34,3	8 260

Taulukosta 6 nähdään, että suurimmat tuottopotentiaalit ovat edelleen FCR-N-markkinoilla. Verrattaessa taulukkoja 5 ja 6 voidaan todeta, ettei tuottopotentiaaleilla ole suuriakaan eroavaisuuksia keskenään. Vaikka kapasiteettia on huomattavasti enemmän tarkasteltaessa järjestelmiä jouston keston mukaan, niin pysyvyys on samalla paljon pienempi. Asiaan vaikuttaa myös samanaikaistamisen kerroin.

6.3 Investointimahdollisuuksia

Toisin kuin taloteknisillä järjestelmillä, erilaisilla laiteinvestoinneilla päästään helposti vaadittuihin tehoihin, aktivointinopeuksiin ja ajalliseen kestoon. Vaatimuksena on järjestelmien tarkoituksenmukainen suunnittelu. Investointimahdollisuuksista tarkasteltiin tutkimuksessa energiavarastoja ja sähkökattiloita. Kiinteistökannan aggregoiminen rajattiin resurssien takia työstä ulos.

Energiavarastojen ideana kulutusjoustossa on osallistua reservimarkkinoilla sekä ylös- että alassäätöön. Akuston kapasiteettia ladataan prosessista ja myydään ylössäädössä verkkoon. Alassäädössä akustoa ladataan verkosta. Investointimahdollisuutena pohdittiin kappaleessa 4.2.2 tarkasteltua Vihreän Watti Oy:n 3 086 kWh energiakonttia. Energiakontin nimellistehoksi on ilmoitettu 1 543 kW, eli oletuksena tarkastelussa on, että kontti pystyy 1,5 MW purkutehoon.

Akuston pysyvyys reservimarkkinoilla määriteltiin analysoimalla kiinteistön osto- ja myyntisähkön tuntitason kulutusdataa. Myytävästä sähköenergiasta laskettiin, kuinka paljon sillä voidaan ladata akustoa. Laskenta suoritettiin laskemalla jokaiselle tunnille akuston kapasiteetti niin, että prosessista ladataan maksimissaan tunnin aikana 1,5 MW sähköenergiaa akkuun, kuitenkin niin, ettei 3 MWh kapasiteetti ylity. Kapasiteetista myös vähennettiin ostettavan sähköenergian määrä, jolloin akustosta on hyötyä reservimarkkinoiden ulkopuolella. 1,5 MW tehoinen latausteho varmistettiin sopivaksi ostosähkön ja akun kapasiteetin vuoden keskiarvojen perusteella. Kapasiteetin keskiarvoon lisättiin latausteho, ja siitä vähennettiin ostosähkön keskiarvo. Tällöin akustoa voidaan ladata viisi tuntia peräkkäin ilman, että akun kapasiteetti tulee täyteen. Voidaan olettaa, että reservimarkkina ei aktivoidu viitenä tuntina peräkkäin.

Pysyvyydeksi ylössäätö- ja symmetrisillä markkinoilla laskettiin yhteen vuoden tunnit, jolloin akun kapasiteetti on 1–2 MW. Näiden tuntien aikana akustossa on tarvittava säätövara kyseisillä markkinoilla toimimista varten. Vuoden aikana näitä tunteja on yhteensä 482. Alassäätömarkkinoilla akustoa ladataan verkosta, jolloin pysyvyydeksi määriteltiin tunnit, kun kapasiteetti on 0–2 MW. Vuoden aikana akuston kapasiteetti oli tämän verran yhteensä 7 477 tuntia.

Taulukossa 7 on esitetty energiakontin arvioidut vuosituotot reservimarkkinoilla 1 MW kapasiteetilla. Arvio vuosituotoista laskettiin kappaleessa 4.3 esitetyn kaavan 7 mukaan. Hankintahinta ja kauppojen muodostumisen todennäköisyys ovat määritelty kappaleessa 4.3 taulukossa 1.

Taulukko 7. Energiavaraston tuottopotentiaali reservimarkkinoilla.

Reservi-markkina	Kapasiteetti (MW)	Hankintahinta (€/MW/h)	Pysyvyys (h/a)	Todennäköisyys (%)	Arvioitu vuosituotto (€)
FCR-N	1	45,83	482	49,6	10 957
FCR-D, ylös	1	18,54	482	34,3	3 065
FCR-D, alas	1,5	16,58	7 477	33,5	62 294
FFR	1	27	482	13,6	1 770
aFRR, ylös	1	26,21	482	62,8	7 934
aFRR, alas	1,5	23,48	7 477	31,2	82 162
mFRR, ylös	1	8	482	44,7	1 724
mFRR, alas	1,5	13	7 477	59,7	87 043

Taulukosta 7 nähdään, että suurin tuottopotentiaali energiavarastolla on mFRR, alassäätömarkkinalla. Toiseksi suurin potentiaali on aFRR, alassäätömarkkinalla ja kolmanneksi suurin FCR-D, alassäätömarkkinalla. Pienin tuottopotentiaali on mFRR ylössäätömarkinalla. Toiseksi pienin potentiaali on FFR-markkinalla ja kolmanneksi pienin FCR-D, ylössäätömarkkinalla. Suuret erot tuottopotentiaaleissa johtuu oletettavasti suurista eroista pysyvyyksissä. Erot pysyvyyksissä taas johtuvat energiavaraston kapasiteetista vuoden aikana. Suurimman osan vuodesta energiavaraston kapasiteetti on liian alhainen, jotta siitä voitaisiin syöttää sähköenergiaa verkkoon. Kaikkien reservimarkkinoiden arvioidut vuosituotot ovat yhteensä 256 949 €. Vaikka tarkasteltaisiin vain neljää kannattavimman oloista markkinaa, niin arvioidut vuosituotot ovat silti 242 456 €.

Sähkökattiloiden kulutusjoustolla osallistuttaisiin reservimarkkinoilla alassäätöön. Sähkökattilan vastuksella lämmitetään vettä, kun reservi aktivoituu. Tutkimuksen kohteesta löytyy jo olemassa olevat puskurisäiliöt, jonka vuoksi ainoa tarvittava investointi olisi itse sähkökattila. Investointimahdollisuutena pohdittiin kappaleessa 4.2.3 tarkasteltua Finessin 1 MW sähkökattilaa. Tarkastelussa on käytetty oletuskapasiteettina 1 MW tehoa. Pysyvyytenä voidaan pitää koko vuoden tunteja. Kattilan sähkövastuksia voidaan periaatteessa pitää koko ajan päällä, jos puskurisäiliöille on käytössä ylilämmönpoisto.

Huomionarvoista on myös se, että reservit eivät aktivoidu joka tunti. Sähkökattilan tuottopotentiaali reservimarkkinoilla on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Sähkökattilan tuottopotentiaali reservimarkkinoilla.

Reservimarkkina	Hankintahinta (€/MW/h)	Todennäköisyys (%)	Arvioitu vuosituotto (€)
FCR-D, alas	16,58	33,5	48 656
aFRR, alas	23,48	31,2	64 174
mFRR, alas	13	59,7	67 986

Taulukosta 8 nähdään, että kaikilla kolmella reservimarkkinalla on hyvät tuottopotentiaalit. Tuottopotentiaalit eivät ihan yletä energiavaraston tuottopotentiaalien tasolle, mutta investoimalla suuritehoisempaan kattilaan, päästäisiin huomattavasti suurempiin vuosituottoihin. Kaikkien reservimarkkinoiden arvioidut vuosituotot sähkökattilalla ovat yhteensä 180 816 €. Vuosituotot ovat 61 640 € vähemmän kuin energiavarastolla neljällä kannattavimmalla reservimarkkinalla. Laiteinvestointien hintoja ja takaisinmaksuaikoja verrattiin keskenään kappaleessa 4.3. Sähkökattilan takaisinmaksuajan todettiin olevan kolmasosa energiavaraston takaisinmaksuajasta.

Tutkimuksen keskeisimpänä tuloksena voidaan pitää olemassa olevan talotekniikan rajallista joustavuutta kulutusjoustossa. Vaikka tutkimuksen kohdekiinteistö on teollisuusrakennus, edes tämän yksittäisen kiinteistön olemassa oleva talotekniikka ei riitä reservimarkkinoilla pitkälle. Kuitenkin yksittäisillä lisäyksillä reservimarkkinoille osallistuminen saavutetaan helposti. Tutkimuksen tulosten myötä voidaan myös todeta reservimarkkinoiden tuottopotentiaalin olevan huomattava.

7 Pohdinta ja johtopäätökset

Tutkimustyön tulosten pohdinnassa voidaan havaita selkeitä kohtia, joissa tutkimuksen laatuun ja tuloksiin on vaikutettu. Kolme selkeää seikkaa nousi esiin, joissa eri tavalla toimittaessa olisi päädytty erilaiseen lopputulokseen. Näistä seikoista huolimatta tutkimuksen tuloksia voidaan pitää riittävän oikeanmukaisina. Neljäs asia, joka herätti huomiota, oli ristiriitaiset tulokset verrattuna aiempaan tutkimukseen. Ristiriitaiset tulokset voidaan kuitenkin myös selittää muutamalla yksinkertaisella tekijällä.

Tutkimuksen tavoitteet savutettiin ja tulosten perusteella pystyttiin tekemään johdonmukaisia johtopäätöksiä. Johtopäätöksien avulla tutkimuksen tulokset tiivistettiin lyhyesti muutaman kohdan listaksi. Listaa analysoimalla esitettiin tutkimusta eteenpäin ohjaavia suositeltavia toimenpiteitä sekä arvioitiin kannattavaa suuntaa jatkotutkimuksille.

7.1 Pohdinta

Tutkimustyön tuloksia analysoitaessa voidaan kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin, jotka mahdollisesti vaikuttivat tutkimuksen lopputuloksiin. Huomionarvoisinta on oletettavasti vielä jokseenkin rajallinen lähdemateriaali reservimarkkinoista, sillä ne ovat olleet käytössä vasta muutamia vuosia. Tämän takia saatavilla ei ole paljoa aiempaa tutkimusta eikä dataa. Myöskään talotekniikan soveltuvuutta reservimarkkinoille ei ole oikeastaan tutkittu aiemmin.

Toisena lopputuloksiin vaikuttaneena tekijänä voidaan pitää aiemman asiantuntemuksen pohjalta määriteltyjä taloteknisten järjestelmien jouston kapasiteetteja sekä pysyvyyksiä. Näillä on merkittävä vaikutus reservimarkkinoiden vuotuisiin tuottopotentiaaleihin. Tuottopotentiaalit saadaan näiden parametrien avulla näyttämään niinkin hyvältä tai heikolta kuin halutaan.

Kolmas asia, joka vaikutti tuloksiin, on yksinkertaistetut laskentakaavat, joilla järjestelmien ja investointien tuottopotentiaalia reservimarkkinoilla tarkasteltiin. Tarkempiin tuloksiin olisi päästy käyttämällä todellisia reservimarkkinoiden tuottopotentiaalien arvioimiseen tarkoitettuja laskentaohjelmia. Tuottopotentiaalien tulokset vaikuttavat kuitenkin kohtuullisilta, jonka vuoksi niitä voidaan pitää niin tarkkoina mihin käytetyillä menetelmillä päästään.

Kappaleessa 4.2.2 todettiin, että aiemman tutkimuksen perusteella energiavarastojen vuotuiset tuotot FCR-N-reservimarkkinalla oli noin 38 000 €. Kappaleessa 6.3 tarkastellulla energiavarastolla päästiin kuitenkin vain noin 11 000 € vuotuisiin tuottopotentiaaleihin FCR-N-markkinalla. Tulokset olivat jokseenkin erikoisia, koska tarkastellun energiavaraston kapasiteetti oli melkein kaksinkertainen verrattuna aiemman tutkimuksen energiavarastoon.

Tuloksiin on voinut vaikuttaa useampi eri asia. Ensimmäisenä mainittakoon pysyvyys, joka oli tutkimustyössä hyvin matala. Tämä johtuu kiinteistön prosessitoiminnasta, johon ei voida vaikuttaa. Myöskään taloteknisten järjestelmien toiminnallisuuden ei tulisi häiriintyä kulutusjouston takia. Toisena voidaan pohtia, onko aiemmassa tutkimuksessa huomioitu kauppojen syntyvyyden todennäköisyyttä. Myös tämän tutkimuksen kauppojen syntyvyyden todennäköisyyttä voidaan jokseenkin kyseenalaistaa. Reservimarkkinoilla tarjouksia hyväksytään hintajärjestyksessä alhaisimmista hinnoista alkaen, jonka vuoksi todellisuudessa tarjouksen hyväksymiseen voi vaikuttaa tarjoamalla reserviä matalalla hinnalla. Kolmantena voidaan olettaa, että aiemmassa tutkimuksessa on käytetty reservimarkkinoiden tuottopotentiaalien arvioimiseen tarkoitettuja tarkkoja laskentamalleja. Neljäntenä voidaan vielä pohtia markkinoiden mahdollisesti jo alkanutta saturoitumista.

7.2 Johtopäätökset

Tutkimustyön tavoitteena oli selvittää teollisuuskiinteistön taloteknisten järjestelmien sekä muutaman erilaisen laiteinvestoinnin potentiaalit reservimarkkinoilla. Merkittävimpiä johtopäätöksiä ovat olemassa olevan talotekniikan pieni potentiaali sekä reservimarkkinoiden tuottopotentiaalin tulosten helppo muokattavuus. Tavoitteisiin päästiin tutkimustyön toteutuksessa, ja tulosten perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

1. Kiinteistön olemassa olevalla talotekniikalla ei ole tuottopotentiaalia reservimarkkinoilla
2. Laskelmien tuloksia voidaan muokata paremmiksi sekä heikommiksi
3. Investointien tuottopotentiaalit vaikuttavat lupaavilta

Johtopäätösten perusteella suositellaan seuraavia jatkotoimenpiteitä:

1. Tarkempiin laskentamalleihin perehtymistä
2. Tuottopotentiaalien analysoinnin yhdenmukaistamista
3. Investointimahdollisuuksien tarkempaa tutkimusta

Johtopäätösten ja suositusten myötä voidaan todeta, että reservimarkkinoissa riittää tutkittavaa ainakin markkinoiden saturoitumiseen asti. Uusia toimintatapoja, laitteita, analysointimenetelmiä ja laskentamalleja tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti. Tutkimus kannattaa jatkossa keskittää kestäviin ja pitkäikäisiin järjestelmiin. Järjestelmien tuottopotentiaaleissa, takaisinmaksuajoissa, kannattavuudessa ja elinkaaressa on paljon aihetta jatkotutkimuksia varten. Markkinat ovat kuitenkin kohtuullisen tuore ilmiö, eikä esimerkiksi kovin tarkkaa dataa tai ymmärrystä laitteiden kestävyydestä vielä ole saatavilla. Riskinä on ehdottomasti markkinoiden yhtä nopea ehtyminen kuin käynnistyminen.

8 Yhteenveto

Tutkimus aloitettiin tutustumalla kulutusjouston teoriaan ja siihen, miten rakennusten energiatehokkuus liittyy aiheeseen. Energiatehokkuus on hyvin riippuvainen talotekniikasta ja järjestelmien sähköenergian kulutuksesta, jonka takia käytiin läpi kiinteistön teknisissä järjestelmissä sähköenergiaa kuluttavat laitteet ja komponentit. Energiatehokkuudesta siirryttiin tutkimaan mitä itse kulutusjousto on ja miksi se on tärkeä aihe. Todettiin, että kulutusjoustoa tarvitaan pitämään sähköverkko tasapainossa, inertiaa tuottamattomien energian tuotantomuotojen kasvaneen tuotantokapasiteetin takia. Tämän jälkeen yhdistettiin rakennusten energiatehokkuuden teoria kulutusjoustomalleihin. Implisiittisen ja eksplisiittisen kulutusjouston erot määriteltiin Venn-diagrammilla: mitkä kulutusjouston mallit toteuttavat mitäkin energiatehokkuuden toimenpiteitä ja mitä kulutusjouston malleja implisiittinen ja eksplisiittinen kulutusjousto noudattavat.

Kulutusjouston teorian tutkimisen jälkeen tarkasteltiin sähköverkon rakennetta ja toimintaa sekä sähkömarkkinoita. Suomen sähköverkko jakaantuu kantaverkkoon ja jakeluverkkoon. Kantaverkon ylläpidosta ja reservimarkkinoista Suomessa vastaa Fingrid. Toimiakseen häiriöttömästi sähköverkon taajuuden on pysyttävä 50 Hz:ssä. Reservimarkkinat sijoittuvat sähkömarkkinoilla tukkumarkkinoiden fyysisille markkinoille. Reservimarkkinat voidaan jakaa taajuusohjattuun käyttö- ja häiriöreserviin, taajuuden palautusreserviin sekä nopeaan taajuusreserviin. Korvauksia reservimarkkinoilla maksetaan ylläpidetystä säätökapasiteetista ja aktivoituneesta reservistä. Reservimarkkinoilla puhutaan ylös- ja alassäädöstä riippuen siitä, kumpaan suuntaan verkon taajuutta halutaan säätää.

Viimeisenä teorian osalta tarkasteltiin, mitä kiinteistöiltä vaaditaan reservimarkkinoille osallistuttaessa, erilaisia teknisiä vaihtoehtoja reservimarkkinoilla toimimiseen sekä reservimarkkinoilta saatavaa taloudellista hyötyä. Lähtökohtina ovat säädettävän kapasiteetin koko, järjestelmien ohjattavuus sekä toimiva datan kerääminen. Taloteknisten

järjestelmien säädettävä kapasiteetti pystytään selvittämään laskemalla järjestelmien sähkötehot yhteen. Järjestelmiä ei kuitenkaan voida tarkastella yhtenä kokonaisuutena toiminnallisten eroavaisuuksien takia. Reservimarkkinoille osallistuminen etenee selvitystöiden ja tarvittavien toimenpiteiden kautta järjestelmien säätökokeisiin. Kun säätökokeet on hyväksytty, järjestetään tietoliikenneyhteydet ja allekirjoitetaan sopimukset ennen kuin kaupankäynti voidaan aloittaa. Teknisinä vaihtoehtoina reservimarkkinoille osallistumiseen esitettiin kiinteistöjen aggregointi, energiavarastot ja sähkökattilat. Lähemmin tarkasteltiin soveltuvuuksia reservimarkkinoille, järjestelmien hintoja ja takaisinmaksuaikoja. Lopuksi analysoitiin reservimarkkinoilta saatavaa taloudellista hyötyä.

Teorian analysoinnin jälkeen tarkasteltiin tutkimuksen case-kohdetta. Case-kohteena oli suuri teollisuuskiinteistö, joka tuottaa toimintansa ohella sähkö- ja lämpöenergiaa. Tutkimuksen lähtökohdiksi rajattiin kiinteistön taloteknisten järjestelmien potentiaalin selvitys reservimarkkinoilla sekä, onko kannattavaa investoida mahdollisesti uusiin laitteisiin. Tärkeimpänä tutkimusaineistona käytettiin kiinteistön rakennusaikaisia suunnitelmia. Tutkimuksen valmistelut aloitettiin käymällä kiinteistön talotekniikka järjestelmäkohtaisesti läpi ja laskemalla järjestelmäkohtaiset sähkötehot yhteen. Kiinteistön lämmityksessä hyödynnetään hukkalämmön talteenottoa, jota tehostetaan lämpöpumpulla. Jäähdytystä varten rakennuksessa on viisi VJK:ta. Ilmanvaihto on toteutettu koneellisena tulo-poisto-ilmanvaihtona, yhteensä rakennuksessa on 45 ilmanvaihdon osajärjestelmää. Valaistus on pääosin toteutettu DALI-ohjauksella.

Tutkimuksen tuloksina saatiin määriteltyä taloteknisten järjestelmien joustopotentiaalit arvioimalla mistä järjestelmien osista voidaan joustaa ja kuinka kauan. Tuloksissa oleellisinta markkinoille pyrittäessä on jouston kapasiteetti ja tuottojen maksimoinnissa jouston kesto. Suurin joustopotentiaali oli kiinteistön jäähdytysjärjestelmissä. Seuraavana oli ilmanvaihto, kolmantena valaistus ja viimeisenä lämmitysjärjestelmä. Koko kiinteistön sähkötehosta noin puolet voidaan hyödyntää kulutusjoustossa.

Taloteknisten järjestelmien osalta todettiin niiden soveltuvan reservimarkkinoilla ylössäätöön lukuun ottamatta lämpöpumppua ja VJK:ita, joilla voidaan osallistua molempiin. Tämän jälkeen analysoitiin soveltuvia kulutusjouston malleja ja toteutustapoja järjestelmäkohtaisesti. Järjestelmille laskettiin vuotuiset tuottopotentiaalit FCR-N-reservimarkkinalla. Tuottopotentiaalit laskettiin myös jouston keston mukaan, jotta muitakin markkinoita voitiin vertailla. Tuottopotentiaaleilla ei ollut suurtakaan eroa riippuen siitä, oliko tarkastelu tehty järjestelmäkohtaisesti vai jouston keston mukaan.

Mahdollisista laiteinvestoinneista energiavarastoilla voidaan osallistua sekä ylös- että alassäätöön. Energiavarastolle määriteltiin osto- ja myyntisähkön tuntidatan perusteella pysyvyydet riippuen siitä, osallistutaanko ylös- vai alassäätömarkkinalle. Pysyvyyksien avulla laskettiin vuotuiset tuottopotentiaalit kaikilla reservimarkkinoilla. Sähkökattiloilla voidaan osallistua alassäätömarkkinoille, periaatteessa myös ylössäätöön. Ylilämmön poiston avulla pysyvyytenä voitiin pitää koko vuoden tunteja. Sähkökattilan tuottopotentiaalit olivat jokseenkin pienemmät kuin energiavaraston, mutta samoin olivat myös investointikustannukset ja takaisinmaksuajat.

Tuloksia pohdittaessa huomio kiinnittyi rajalliseen lähdemateriaaliin, aiemman asiantuntemuksen pohjalta määritellyt jouston kapasiteettien ja pysyvyyksien todenmukaisuuksiin sekä yksinkertaistettuihin laskukaavoihin. Tärkeimpänä johtopäätöksenä tutkimuksesta esitettiin, ettei nykyisellä talotekniikalla ole tuottopotentiaalia reservimarkkinoilla. Jatkotoimenpiteinä suositeltiin tarkempiin laskentamalleihin perehtymistä ja laiteinvestointien tarkempaa tutkimista.

Lähteet

Astero, P. & Evens, C. (2020, 1. marraskuuta). Optimum Operation of Battery Storage System in Frequency Containment Reserves Markets. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11, 4906–4915. https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2997924

Electrical Technology. (n.d.). *Classification of Electric Power Distribution Network Systems*. Noudettu 17.12.2024 osoitteesta https://www.electricaltechnology.org/2021/10/electric-power-distribution-network.html

Energiateollisuus. (n.d. -a). *Kulutusjousto*. Noudettu 11.12.2024 osoitteesta Kulutusjousto - Energiateollisuus

Energiateollisuus. (n.d. -b). *Sähköverkot*. Noudettu 17.12.2024 osoitteesta https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/

Energiateollisuus. (n.d. -c). *Tukkumarkkinat*. Noudettu 28.7.2025 osoitteesta Tukkumarkkinat - Energiateollisuus

Fingrid. (2025a). *Kantaverkko ja sen kehittäminen*. Noudettu 13.2.2025 osoitteesta https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/

Fingrid. (2025b). *Reservimarkkinainformaatio*. Noudettu 7.5.2025 osoitteesta Reservimarkkinainformaatio - Fingrid

Fingrid. (2025c). *Reservituottolaskuri*. Noudettu 12.6.2025 osoitteesta Reservituottolaskuri - Fingrid

Fingrid. (2025d). *Yleistietoa sähkömarkkinoista.* Noudettu 28.7.2025 osoitteesta Yleistietoa sähkömarkkinoista - Fingrid

Fingrid. (2024a). *Reservimarkkinat*. Noudettu 9.12.2024 osoitteesta Reservimarkkinat - Fingrid

Fingrid. (2024b, 12. joulukuuta). *Sähköjärjestelmän tila*. Noudettu 12.12.2024 osoitteesta Sähköjärjestelmän tila - Fingrid

Fingrid. (2024c). *Yhtenäiset sähkömarkkinat*. Noudettu 19.2.2025 osoitteesta https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/

Granlund Oy. (2024a). *Talotekniikka*. Noudettu 2.12.2024 osoitteesta https://www.granlund.fi/talotekniikka/

Granlund Oy. (2024b). *Granlund Manager – Selkeyttä kiinteistöjohtamiseen*. Noudettu 2.12.2024 osoitteesta https://www.granlund.fi/palvelut/granlund-manager-ohjelmisto/

Hyvärinen, J. (2024). Luku 15: Rakennusautomaatio. Teoksessa *Rakennusten energiatekniikka* (1. painos, s. 206–209). Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Ketomäki, J. (2024). Luku 7: Rakennusten sähkönkulutus ja -tuotto. Teoksessa *Rakennusten energiatekniikka* (1. painos, s. 86). Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Lampropoulos, I. (2014). *Energy management of distributed resources in power systems operations* [väitöskirja, Technische Universiteit Eindhoven]. TUe. https://doi.org/10.6100/IR771935

Motiva Oy. (2024a, 11. lokakuuta). *Valaistus*. Noudettu 19.2.2025 osoitteesta https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/valaistus

Motiva Oy. (2024b, 29. lokakuuta). *Asiaa energiasta: Taloyhtiöiden energiavarastot ja kulutusjoustoon osallistuminen*. Noudettu 9.12.2024 osoitteesta https://www.youtube.com/watch?v=v3c8kH5TTMM

Motiva Oy. (2024c, 22. marraskuuta). *Sähkön kulutusjousto – Joustavaa ja älykästä sähkönkäyttöä*. Noudettu 12.12.2024 osoitteesta Sähkön kulutusjousto - Motiva

Nord Pool. (2020). *Curtailment, price thresholds and decoupling*. Noudettu 29.7.2025 osoitteesta Curtailment, price thresholds and decoupling | Nord Pool

Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M. & Kamel, S. (2022). Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.300

Rakennustieto Oy. (2008). *Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot*. Noudettu 13.6.2025 osoitteesta RT-kortistot | RT 18-10922 [rajattu pääsy]

Rautiainen, A. (2024, 12. joulukuuta). *Sähkömarkkinat* [luentomateriaali]. Moodle [rajattu pääsy]. Noudettu 3.3.2025 osoitteesta Työpöytä | uwasa

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Finlex. Noudettu 6.6.2025 osoitteesta http://data.finlex.fi/eli/sd/2013/588/ajantasa/2025-04-25/fin

Tilastokeskus. (2024, 16. joulukuuta). *Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus 2023*. Noudettu 11.1.2025 osoitteesta https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html

Vattenfall. (n.d. -a). *Sähköverkko ja sähkönjakelu*. Noudettu 17.12.2024 osoitteesta https://energyplaza.vattenfall.fi/sahkoverkko-ja-sahkonjakelu

Vattenfall. (n.d. -b). *Tehotasapaino*. Noudettu 2.5.2025 osoitteesta https://energyplaza.vattenfall.fi/tehotasapaino

Vihreä Watti Oy. (n.d.). *Energiakontti 20ft 3086kWh 0,5C, Tuotekortti*. Noudettu 3.6.2025 osoitteesta Energiakontti 20ft 3086kWh 0,5C - Vihreä Watti Oy

Virta Global. (2025). *Älykkäät energianhallintaratkaisut*. Noudettu 14.6.2025 osoitteesta https://www.virta.global/fi/latausratkaisu/energianhallinta

VTT. (2023). *Sähkön kulutusjousto: rahanarvoisia mahdollisuuksia kaupallisille toimijoille*. Noudettu 11.12.2024 osoitteesta Sähkön kulutusjousto: rahanarvoisia mahdollisuuksia kaupallisille toimijoille | VTT