



Sähköenergiavaraston hyödyntäminen kiinteistössä

Seppo Sillanpää

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

SILLANPÄÄ, SEPPO:
Sähköenergiavaraston hyödyntäminen kiinteistössä

Opinnäytetyö 37 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Joulukuu 2023

Työn tavoitteena oli selvittää sähköenergiavaraston hyödyntämismahdollisuuksia kiinteistössä, tutustua varastoinnin tekniikkaan sekä ominaisuuksiin ja mitoitaa kohdekiinteistöön sopiva sähköenergiavarasto. Työn toimeksiantaja oli Granlund Lahti.

Työssä tutustuttiin lähdeaineiston avulla sähköenergian varastointimahdollisuuksiin, käytössä oleviin teknologioihin ja niiden ominaisuuksiin. Työssä tarkasteltiin neljää erilaista skenaariota, jotka perustuivat kiinteistön energianmittaustietoihin vuodelta 2022. Skenaarioissa vaihdeltiin sähköenergiavaraston käyttötarkoituksia ja käyttötarkoituskohdekohtaisia kapasiteettivaroja. Jokaista skenaariota tarkasteltiin talouden näkökulmasta perustuen reservimarkkinoiden vuosina 2022 ja 2023 toteutuneisiin markkinatietoihin sekä huomioiden ikääntymisen vaikutukset sähköenergiavaraston akkujen ominaisuuksiin.

Tulokseksi saatiin eri skenaarioiden sähköenergiavarojen takaisinmaksuajat. Kahdessa skenaariossa sähköenergiavarasto oli teknistaloudellisesti kannattava investointi. Suurimmat taloudelliset hyödyt sähköenergiavarastolle saatiin reservimarkkinoilta. Taloudellisesti kannattamattomat tulokset tulivat skenaariossa, jossa reservimarkkinoille ei osallistuttu lainkaan sekä skenaariossa, jossa reservimarkkinoille osallistuttiin alle puolella käytettävissä olevasta kapasiteetista.

Tulosten perusteella sähköenergiavaroja on mahdollista hyödyntää kiinteistöissä teknistaloudellisesti kannattavasti. Sähköenergiavarasto hyödyttää paitsi kiinteistöä myös sähköverkkoa, koska se osallistaa reservimarkkinoita ja tasaa kulutushuippuja.

Asiasanat: sähköenergiavarasto, akusto, sähkökemiallinen energiavarasto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Power Engineering

SILLANPÄÄ, SEPPO:
Utilisation of Energy Storage Systems in Buildings

Bachelor's thesis 37 pages, appendices 1 pages
December 2023

The purpose of this study was to gather information about electrical energy storages and how to utilise them in buildings. In addition, the aim was to design optimal sizing for the electrical energy storage for the customer's building.

The information about electrical energy storages were gathered from written sources. For the designing of electrical energy storage, the building's energy measurement data were analysed, and four sizing scenarios were made by those analyses. Each scenario had unique features in respect of electrical energy storage's technical attributes or subject of utilisation. The scenarios were surveyed from the economical viewpoint based on the actualised reserve markets' data from recent years. The economical surveys took notice of effects of the electrical energy storages' batteries aging.

The economical surveys' results suggested that participation in reserve markets were the most economical use of electrical energy storages. Participation in reserve markets were essential to reduce the payback-time below fifteen years, which is the most optimistic lifetime of electrical energy storages.

The findings indicate that it is possible to utilise electrical energy storages in buildings cost-effectively. In addition to benefitting buildings, electrical energy storages can benefit electrical grid due to participating in reserve markets and diminishing consumption peaks.

Key words: electrical energy storage, battery, electrochemical energy storage

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖENERGIAVARASTOT	7
	2.1 Sähköenergiavaraston toimintaperiaatteet.....	7
	2.2 Sähköenergiavarasto kiinteistössä.....	9
3	SÄHKÖ- JA RESERVIMARKKINOIDEN TOIMINTAPERIAATEET	11
	3.1 Sähkömarkkinat	11
	3.2 Reservimarkkinat	13
	3.2.1 Taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N.....	14
	3.2.2 Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D	16
	3.2.3 Nopea taajuusreservi FFR.....	18
	3.2.4 Taajuuden palautusreservi FRR	19
4	SÄHKÖENERGIAVARASTON MITOITUS	21
	4.1 Referenssikohteen tekniset tiedot ja kulutusprofiili.....	21
	4.2 Sähköenergiavaraston hyödyntämismahdollisuudet	23
	4.3 Sähköenergiavaraston mitoitus eri skenaarioilla	24
5	TEKNISTALOUEDELLINEN TARKASTELU	27
	5.1 Skenaario 1	27
	5.2 Skenaario 2	29
	5.3 Skenaario 3	31
	5.4 Skenaario 4	32
6	POHDINTA	33
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	37
	Liite 1. Skenaarion 1 huipputehon leikkauksen mallinnus.....	37

LYHENTEET JA TERMIT

aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve. Automaattinen taajuudenhallintareservi.
FCR	Frequency Containment Reserve. Taajuuden vakautusreservi.
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.
Fingrid	Suomen kantaverkkoyhtiö.
FRR	Frequency Restoration Reserve. Taajuuden palautusreservi.
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö.
kVA	Kilovolttiampeeri, eli 1 000 volttiampeeria, näennäistehon yksikkö.
kW	Kilowatti, eli 1 000 wattia, pätötehon yksikkö.
kWh	Kilowattitunti, eli 1 000 wattituntia, energian yksikkö.
LFP	Litiumrautafosfaatti.
mFRR	Manuaalinen taajuudenhallintareservi.
MW	Megawatti, eli 1 000 000 wattia, pätötehon yksikkö.
MWh	Megawattitunti, eli 1 000 000 wattituntia, energian yksikkö.
NCA	Nikkelin, koboltin ja alumiinin yhdistelmä.
NMC	Nikkelioksidin, mangaanioksidin ja kobolttioksidin yhdistelmä.

1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa sähköntuotanto perustuu entistä enemmän aurinko- ja tuulisähkөөn, mikä luo tarvetta energian varastoinnille. Litiumioniakkujen hintakehitys on tekemässä niistä entistä yleisempiä, ja autojen sähköistämässä akuilla on jo suuri rooli. (Vartiainen 2020.)

Sähköenergiavarastojen hyödyntämisessä osana kiinteistöjen sähköjärjestelmää on vielä paljon käyttämätöntä potentiaalia. Tässä opinnäytetyössä on tavoitteena tutustua sähköenergiavarastoihin ja akustoihin, selvittää niiden hyödyntämismahdollisuuksia kiinteistössä sekä tarkastella sähköenergiavarastoon investoimisen kannattavuutta mitoittamalla esimerkkikohteeseen teknistaloudellisesti kannattava sähköenergiavarasto.

Mitoituksen sopivuutta arvioidaan laskennallisesti ja tarkoituksena on selvittää eri kokoisten sähköenergiavarastojen ja eri käyttötarkoitusten takaisinmaksuaikoja. Lisäksi tarkastellaan mahdollisuutta hyödyntää sähköenergiavarastoa varavoi-makäytössä, mikä mahdollistaa vihreämmän energian hyödyntämisen sähkökat-kotilanteissa.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Granlund Lahti, joka on Granlund Oy:n aluetoimisto. Granlund on vuonna 1960 perustettu kiinteistö- ja rakennusalan yhtiö, jonka toimialoja ovat esimerkiksi talotekninen suunnittelu ja energia-, ympäristö- ja kiinteistöalan konsultointi. Granlundilla työskentelee 1400 asiantuntijaa, ja innovaatiotoimintaan, kuten opinnäytetöihin, panostetaan kuusi prosenttia lii-kevaihdistaan. (Granlund n.d.)

Luvussa kaksi käsitellään sähköenergiavastoja yleisesti sekä niiden hyödyntämismahdollisuuksia kiinteistöissä. Luvussa kolme käsitellään sähkömarkkinoiden ja reservimarkkinoiden toimintaa. Luvussa käsitellään myös mihin reservimarkki-natuotteisiin sähköenergiavarastot soveltuvat. Luvussa neljä tutustutaan esi-merkkikohteeseen ja luodaan neljä eri skenaariota sähköenergiavaraston mitoi-tukselle ja hyödyntämiskohteille. Luvussa viisi tarkastellaan skenaarioiden tek-nistaloudellista kannattavuutta.

2 SÄHKÖENERGIAVARASTOT

2.1 Sähköenergiavaraston toimintaperiaatteet

Energian varastointiin voi käyttää mekaanista, termodynaamista, sähkökemiallista sekä sähkö- tai magneettikenttään perustuvaa menetelmää. Esimerkkejä mekaanisista energiavarastoista ovat erilaiset vauhtipyörät ja potentiaalienergiään perustuvat ratkaisut. Termodynaamiset ratkaisut perustuvat ilmanpaineeseen, lämmön varastointiin tai lämpökemialliseen varastointiin. Superkondensaattorit ovat sähkökenttään perustuvia ratkaisuja ja magneettikenttään perustuvia ratkaisuja ovat suprajohtavat magneetit. Tässä opinnäytetyössä käsitellään sähkökemiallista ratkaisua eli akkukennoja. (Hoff, 2022, vi–vii.)

Akkukenno koostuu ioneista, elektrolyytistä, anodista (negatiivinen elektrodi), katodista (positiivinen elektrodi), eristeestä ja kuoresta. Ionit liikkuvat kennon sisällä elektrolyytin läpi elektrodista toiseen. Eriste pitää elektrodit erillään toisistaan ja estää elektrolyytin kanssa sisäisen oikosulun, eli elektronien pääsyn elektrodista toiseen kennon sisällä. Kotelo suojaa kennoa ja pitää sen koossa. (Hoff 2022, 144–145.)

Akusto koostuu useasta akkukennosta. Sähköenergiavarasto koostuu akustosta, akunhallintajärjestelmästä, vaihto- ja tasasuuntaajasta, suotimista sekä muuntajasta. Näiden lisäksi sähköenergiavarastossa käytetään kommunikointijärjestelmiä, valvonta- ja suojausjärjestelmiä sekä ilmastointijärjestelmää. (Hoff 2022, 147–150.)

Akkukenno toimii sisäisen kemiallisen reaktion ja ulkoisen virtapiirin avulla. Akkukennoa purettaessa elektronit virtaavat anodista (negatiivinen elektrodi) ulkoista virtapiiriä pitkin katodiin (positiivinen elektrodi) ja ionit tekevät saman kennon sisällä. Akkukennoa voidaan ladata syöttämällä sitä tehonlähteellä, jolloin kierto tapahtuu päinvastoin. (Hoff 2022, 143.)

Sähkökemiallisiin energiavarastoihin on monia eri kemiallisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi lyijyhappo, litiumioni, natriumrikki ja nikkelikadmium. Näistä yleisin on

litiumioniakut, joiden osuus maailman akuista oli noin 80 prosenttia vuonna 2020. (Hoff 2022, 236–237.)

Litiumioniakkujen suosiota selittävät niiden kevyempi ja pienempi rakenne, pienemmät sisäiset purkaushäviöt, joustavampi latausasteen toiminta-alue ja suuri syklistydenkesto. Niiden toiminta ei perustu hapetus-pelkistysreaktioon, vaan litiumionit kiinnittyvät atomikerrosten väliin, ladatessa anodiin ja purettaessa katodiin. (Hoff 2022, 175–176.)

Anodi koostuu pääasiassa hiilestä, grafiitista tai niiden seoksesta. Näiden lisäksi käytetään myös esimerkiksi litiumtitaania, tinan ja koboltin seosta sekä piitä. Litiumtitaanilla on todella hyvä syklikestoisuus, jopa 100 000 sykliä. Lisäämällä hiileen pieniä määriä piitä saadaan kasvatettua energiatiheyttä. Katodi koostuu eri metalleista, fosforin tai hapen seoksista. Yksi yleisimpiä on nikkelioksidin, mangaanioksidin ja kobolttioksidin yhdistelmä eli NMC. Myös nikkelin, koboltin ja alumiinin yhdistelmä NCA sekä rautafosfaatti LFP ovat yleisiä kemioita litiumioniakuissa. Eri materiaalit vaikuttavat akun ominaisuuksiin. Nikkeli parantaa energiatiheyttä, mangaani parantaa lämmönkestävyyttä ja koboltti lisää tehoa. (Hoff 2022, 176–177.)

LFP-akuilla on huonompi energiantiheys verrattuna NCA- tai NMC-akkuihin. LFP-akuilla on kuitenkin korkeampi lämpöryntäyksen piste ja pienempi lämpötilahuippu palotilanteessa, kuin NMC-akulla, joten LFP-kemia on paloturvallisempi. Litiumtitaanin syklikestoisuus voi olla jopa 10 000 sykliä. Syklikestoisuus on määritelmä sille, kuinka monta sykliä akkukemio kestää ennen kuin sen kapasiteetti on pudonnut tietylle tasolle alkuperäisestä kapasiteetista. Tämän syklimäärän jälkeen kapasiteetin pienenemisestä tulee ennakoimattomampaa. Kapasiteettirajan suhde alkuperäiseen kapasiteettiin on akkukemiakohtaista, ja se voi olla jopa 50 prosenttia, kun perinteisten lyijyhappoakkujen arvo on noin 80 prosenttia. LFP-akuilla hyötysuhde on 94–96 prosentin välillä ja metallioksidiaakuilla hyötysuhde on 97–98 prosentin välillä. (Hoff 2022, 182–188.)

2.2 Sähköenergiavarasto kiinteistössä

Sähköenergiavarastoa voidaan hyödyntää kiinteistössä usealla tavalla. Sen avulla voidaan leikata kulutushuippuja, ladata sähköenergiavarastoa halvalla hinnalla ja purkaa kalliimman hinnan aikaan, tukea sähköverkkoa reaktiivisella tai aktiivisella tehon ja taajuuden säätelyllä, lisätä kiinteistön uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energian omakäyttöastetta, tukea dieselgeneraattorin toimintaa tai toimia sähkökatkon aikana itse varavoimana kiinteistölle. (ABB 2023.)

Mikäli sähköenergiavarastolla tuotetaan järjestelmäpalveluita, mitoitus-teho tuotantotilassa on yli 0,8 kilowattia (kW) ja se on suuntaajakytketty, tulee sähköenergiavaraston noudattaa Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin sähkövarastojen järjestelmätekniisiä vaatimuksia. Järjestelmäpalveluilla tarkoitetaan siirto- ja jakeluverkon käyttöä tukevia palveluita tai sähköverkon kuormituksen tasausta ja hallintaa. Reservi- ja sähkömarkkinat kuuluvat siirto- ja jakeluverkon käyttöä tukeviin palveluihin. Sähköenergiavarastoja, joita käytetään varavirtalähteinä tai järjestelminä, jotka turvaavat keskeytymätöntä syöttöä sähköverkon häiriöiden aikana, tulee noudattaa sähkövarastojen järjestelmätekniisiä vaatimuksia vain, jos ne tuottavat järjestelmäpalveluita. Tavoitteena on varmistaa, että sähkövarasto kestää jännite- ja taajuusvaihtelut, tukee häiriötilanteissa sähköjärjestelmän toimintaa sekä toimii luotettavasti häiriötilanteiden aikana. Tavoitteena on myös varmistaa, ettei sähkövarastot aiheuta haittaa muille sähköjärjestelmään kytketyille laitteille sekä varmistaa liittymispisteen verkonhaltijalla sekä Fingridillä olevan tarvittavat tiedot sähkövarastosta sähköjärjestelmän käytön suunnittelemiseksi. Näiden lisäksi liittymisen on noudatettava Fingridin yleisiä liittymisehtoja. (Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset SJV2019 2020, 4, 5, 8.)

Fingridin sähkövarastojen järjestelmätekniisissä vaatimuksissa on neljä eri tyyppiluokkaa porrastettuina tuotantotilan mitoitus-tehon ja jännitetason mukaan. Tyyppiluokat näkyvät taulukossa 1. Tyyppin A ja B liittymispisteen jännitetasoksi katsotaan se jännitetaso, johon sähköenergiavaraston päämuuntaja tai sähköenergiavarasto suoraan ilman päämuuntajaa on liittynyt. Vaatimusten laajuus kasvaa portaittain tyyppiluokan perusteella, eli tyyppille D on tarkemmat ja laajemmalla vaativuudella vaatimukset kuin tyyppille A. (Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset SJV2019 2020, 8.)

TAULUKKO 1. Tyypiluokat sähköenergiavarastoille jännitetason ja mitoitus-
tehon perusteella. (Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset SJV2019
2020, 8.)

Tyypiluokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Tuotantotilan mitoitus-teho
Tyyppi A	Alle 100 kV	Ja	$0,8 \text{ kW} \leq P_{max} < 1 \text{ MW}$
Tyyppi B	Alle 110 kV	Ja	$1 \text{ MW} \leq P_{max} < 10 \text{ MW}$
Tyyppi C	Alle 110 kV	Ja	$10 \text{ MW} \leq P_{max} < 30 \text{ MW}$
Tyyppi D	Vähintään 110 kV	Tai	$P_{max} \geq 30 \text{ MW}$

Kiinteistöön asennettava akusto luokitellaan paikallisakuksi. (SFS-EN IEC 62485-1:2018 2019, 7). Paikallisakkujen perusmenetelmät suojautumiseen elektrolyytin, kaasunkehityksen ja sähköön aiheuttamilta vaaroilta lyijyakuille, nikkeli-kadmium- sekä nikkeli-metallihydridiakuille määritellään standardissa SFS-EN IEC 62485-2:2018 akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimuksien toisessa osassa. Standardissa esitetään vaatimukset perus- ja vikasuojaukselle, poiskytkennälle, erotukselle, oikosulkujen ja sähköön aiheuttamien vaikutusten estämiselle ja suojaukselle, suojaukselle räjähdysvaaralta, suojaukselle elektrolyytin aiheuttamalta vaaralta, sijoittelulle, koteloinnille, varausvirralle, merkinnöille, ohjeistuksille, kuljetukselle, varastoinnille ja kierrätykselle. (SFS-EN IEC 62485-2:2018 2018.)

Paikalliskäytössä litiumioniakkujen asentamisen, kunnossapidon, käytön, tarkastuksen ja hävittämisen turvallisuusvaatimukset määritetään standardissa SFS-EN IEC 62485-5:2018. Vaatimukset on määritelty suojaukselle sähköiskuilta, poiskytkennälle ja erotukselle, oikosulkujen ja sähköön aiheuttamien vaikutusten estämiselle ja suojaukselle, vaaroilta suojautumiselle, kemiallisilta aineilta suojaukselle, sijoittelulle, koteloinnille, varausvirralle, merkinnöille, ohjeille, kuljetukselle, varastoinnille, hävittämiseksi, tarkastukselle, valvonnalle ja paikallissovel-lusten sähköiselle yhteensopivuudelle. Suojautuminen vaaroilta tarkoittaa staat-tisten purkausten estoa työskentelytilanteissa, varausvirran pienentämistä mata-lilla lämpötiloilla litiumin pinnoittumisen estämiseksi sekä sähköisiä varotoimen-piteitä varaus- tai purkausjänniterajoissa pysymiseksi. (SFS-EN IEC 622485-5:2021 2022.)

3 SÄHKÖ- JA RESERVIMARKKINOIDEN TOIMINTAPERIAATEET

3.1 Sähkömarkkinat

Suomessa on voimassa vuonna 2013 säädetty sähkömarkkinalaki, jonka tavoitteena on varmistaa edellytykset kansallisten ja alueellisten sähkömarkkinoiden sekä Euroopan unionin sisämarkkinoiden tehokkaaseen, varmaan ja ympäristöstävälliseen toimintaan. Loppukäyttäjille halutaan turvata kilpailukykyinen sähkön hinta ja toimitusvarmuus, johon pyritään sähkön tuotannon ja toimituksen kilpailun turvaamisella sekä sähköverkkojen toiminnan palveluperiaatteiden ylläpitämisellä. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 1 §.)

Sähkömarkkinoiden osapuolia ovat sähkön myyjät, ostajat ja tuottajat, sekä aggregoinnin, kulutusjouston tai energian varastoinnin tarjoajat (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 3 §, 37). Aggregoinnilla tarkoitetaan sähkömarkkinalain (588/2013) kolmannen pykälän kohdan 21 a mukaan ”toimintaa, jossa yhdistetään usean verkon käyttäjän kuormia tai tuottamaa sähköä myytäväksi, ostettavaksi tai huu- tokaupattavaksi sähkömarkkinoilla”. Nämä osapuolet muodostavat sähkömarkkinoiden kysynnän ja tarjonnan. Sähkömarkkinat on kustannustehokkain tapa tasapainottaa sähkön tuotantoa ja kulutusta sekä varmistaa sähkönsaanti. (Markkinapaikat n.d.)

Kuviossa 1 on esitetty erilaiset markkinapaikat sähkömarkkinoilla. Ne on jaettu johdannaismarkkinoihin, vuorokausimarkkinoihin, päivänsisäisiin markkinoihin, säätö-/reservisähkömarkkinoihin sekä taseselvitykseen. Kaavio etenee kronologisesti vasemmalta oikealle. Johdannaismarkkinoilla käydään kauppaa futuureilla ja optioilla. Se on muodostunut riskienhallintamekanismiksi, jolla sähkön tuottajat suojautuvat tulevaisuuden alhaisemmilta hinnoilta ja vähittäismarkkinoille myyvät osapuolet suojautuvat hintojen nousulta. (Markkinapaikat n.d.)

Johdannaismarkkinat	Vuorokausimarkkinat	Intra-day-markkinat	Säätösähkömarkkinat	Toimitus	Taseselvitys	
Kaupankäynti			Reservimarkkinat			
10 vuotta-päivä eteenpäin	Huutokauppa: Huominen	Jatkuva kaupankäynti: Huominen ja kuluva päivä	Reaaliaika			Toimituksen jälkeen
Tuotteet						
Futuuri, DS futuuri, optiot Vuosi, 3kk, kk ja viikko	Tunti	Tunti	1-60 min		Tasesähkö	

KUVIO 1. Sähkömarkkinoiden markkinapaikat. (Markkinapaikat n.d.)

Vuorokausimarkkinat toimivat huutokauppapohjaisena markkinana seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Koko Suomi on yksi tarjousalue, ellei siirtokapasiteetti rajoita eri alueiden välistä sähkönsiirtoa. Tällöin hinnat eriytyvät alueittain suhteessa siirtokapasiteetin muodostamaan pullonkaulaan. Vuorokausimarkkinoille voi osallistua esimerkiksi Nord Pool tai EPEX Spot sähköpörsseissä. (Markkinapaikat n.d.)

Päivänsisäisillä markkinoilla voidaan käydä kauppaa lähempänä toimitushetkeä. Tämä antaa mahdollisuuden reagoida mahdollisiin ongelmiin sähkön tuotannossa tai yllättäen nousevaan kulutukseen. Suomessa voi käydä kauppaa päivänsisäisillä markkinoilla käyttötuntiin asti, Viron rajalla 30 minuuttia ennen toimitustuntia ja Ruotsin rajoilla 60 minuuttia ennen toimitustuntia. Samat sähköpörsit Nord Pool ja EPEX Spot toimivat myös päivänsisäisinä markkinapaikkoina. (Markkinapaikat n.d.)

Säätösähkömarkkinat ovat Fingridin sekä muiden Pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden ylläpitämät mFRR-säätöenergiamarkkinat (manual Frequency Restoration Reserves). Säätötarjouksia voidaan jättää 45 minuuttia ennen toimitustuntia ja niitä aktivoidaan tehotasapainon tarpeen mukaisesti. Tavoitteena on varmistaa riittävä säätökykyinen kapasiteetti tuotannon ja kulutuksen välisen tasapainon ylläpitämiseksi. Fingridillä on velvoite huolehtia nopeasta häiriöreservistä, josta se huolehtii omilla voimalaitoksillaan sekä käyttöoikeussopimuksilla. Lisäksi tehoreservijärjestelmä lisää toimintavarmuutta, jos suunnitellun hankittavan sähkön määrä ei riitä kulutuksen tarpeisiin. (Markkinapaikat n.d.)

Lisäksi Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita (Markkinapaikat n.d.). Luvussa 3.2 kerrotaan reservimarkkinoista tarkemmin.

Taseselvitys tehdään toimitustunnin jälkeen. Siinä tarkastetaan toteutuneet tuotannot ja kulutukset ja verrataan niitä tarjouksiin. Tasepoikkeama lasketaan joka selvitysjaksolle ja sen perusteella voidaan jakaa tasapainotuksesta jakautuneet kustannukset niille tahoille, jotka ovat epätasapainon tasepoikkeamallaan aiheuttaneet. Tasevastaavat, joilla on tasepoikkeamaa, joko saavat rahaa tai maksavat poikkeaman suuruuden ja tasesähkön hinnan mukaisesti. Tämän on tarkoitus toimia kannustimena pitää tuotanto ja kulutus tasapainossa. Taseselvitystä hoitaa eSett, joka on Pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden muodostama taseselvitysyksikkö. (Markkinapaikat n.d.)

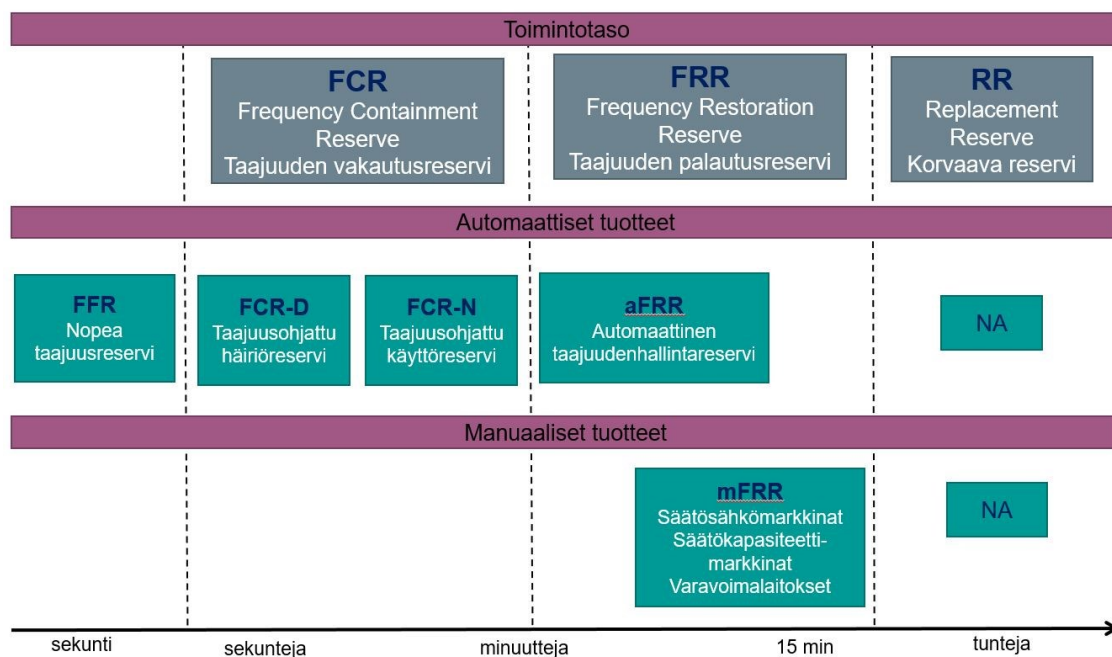
3.2 Reservimarkkinat

Sähkön tuotannon ja kulutuksen pysyminen tasapainossa on tärkeää sähköverkon taajuuden kannalta. Jotta taajuus voidaan pitää tasaisesti 50 Hz:n taajuudessa, pyrkivät sähkömarkkinoiden osapuolet suunnittelemaan tuotantonsa ja kulutuksensa tasapainoisesti. Reservimarkkinoiden tarve syntyy kuitenkin käyttötuntien aikaisten poikkeamien tasapainotuksesta. Reserveinä voivat toimia energiavarastot, voimalaitokset tai kulutuskohteet. (Reservimarkkinat n.d.)

Pohjoismaisen yhteiskäyttöjärjestelmän muodostavat Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Näiden maiden järjestelmävastaavat sopivat reservien ylläpitovelvoitteista. Maakohtaisten reservien hankinta on vapaamuotoista, mutta kunkin maan tulee ylläpitää riittävästi reservejä, jotta saarekekäyttötilanteissa taajuutta voidaan ylläpitää. Lisäksi normaalitilanteessa rajoituksena on, että vain kolmasosa (1/3) velvoitteesta voidaan hankkia muista Pohjoismaista. (Reservimarkkinat n.d.)

Pohjoismaisilla reservimarkkinoilla on viisi eri reservituotetta kuvion 2 mukaisesti. Suomessa näiden markkinoita ylläpitää Fingrid. Nopeaa taajuusreserviä FFR (Fast Frequency Reserve) hankitaan pienen inertian käyttötilanteissa. Taajuuden

vakautusreservejä, eli taajuusohjattua häiriöreserviä FCR-D (Frequency Containment Reserve for Disturbances) ja taajuusohjattua käyttöreserviä FCR-N (Frequency Containment Reserve for Normal operation) käytetään taajuuden hallintaan jatkuvasti. Taajuuden palautusreservejä FRR (Frequency Restoration Reserve), eli automaattista taajuudenhallintareserviä aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve) ja säätösähkömarkkinoista, säätökapasiteettimarkkinoista ja varavoimalaitoksista koostuvaa mFRR (manual Frequency Restoration Reserve) käytetään taajuuden palauttamiseksi normaalialueelle, eli 49,9 — 50,1 Hz alueelle ja vapauttamaan nopeammat jo aktivoituneet taajuuden vakautusreservit käyttöön. Korvaavien reservien käyttötarkoitus on vapauttaa taajuuden palautusreservit käyttövalmiuteen, mutta näitä ei ole käytössä Pohjoismaissa. (Reservimarkkinat n.d.)



KUVIO 2. Fingridin ylläpitämät reservituotteet. (Reservimarkkinat n.d.)

3.2.1 Taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N

Taajuusohjattua käyttöreserviä ylläpidetään pohjoismaisessa yhteiskäyttäjärjestelmässä joka hetki 600 megawatin (MW) verran ja Fingridin velvoite on 121 MW (Reservimarkkinat n.d.). FCR-N-reservin on pystyttävä sekä ylös- että alassää-

töön, ja se pyrkii pitämään taajuuden normaalialueella 49,9–50,1 Hz. FCR-N-reserviä, kuten muitakin taajuuden vakautusreservejä (FCR) hankitaan sekä vuosittain tuntimarkkinoilta. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi n.d.)

FCR-N-reservejä ohjataan automaattisesti paikallisen taajuusmittauksen perusteella. Korvausta maksetaan energiasta ja ylläpidetystä kapasiteetista. Tarjouskoko on vähintään 0,1 MW. Reservin ylläpitokustannukset Fingrid rahoittaa tasepalvelutariffilla. Vähimmäismitoitus täydellä reserviteholla aktivoimiseksi yhtäjaksoisesti on yksi tunti sekä ylös- että alassäätöön. FCR-N soveltuu sähköenergiavarastoille, sillä kyseisessä reservituotteessa vaaditaan nopeaa tehonsäätöä. Muista reservituotteista poiketen FCR-N-reservituotteeseen voi osallistua pienemmällä teholla, jolloin kapasiteetin tarve ei nouse yhtä suureksi kuin taajuuden palautusreserveillä. Kapasiteetin tarve on kuitenkin suurempi kuin taajuusohjatulla häiriöreservillä tai nopealla taajuusreservillä. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2023.)

Vuosimarkkinoille järjestetään syksyisin tarjouskilpailu, jossa määritellään koko vuoden voimassa oleva kiinteä hinta. Vuosimarkkinoille voi osallistua vain syksyn tarjouskilpailun kautta. Tarjoukset hyväksytään hintajärjestyksessä ja vuosimarkkinan hinta määräytyy korkeimman hyväksytyt tarjouksen mukaan. Tuntimarkkinoille voi osallistua ympäri vuoden. Myös vuosimarkkinoille osallistuva reservitoimittaja voi osallistua tuntimarkkinoille, kuitenkin toimitettuaan ensin vuosimarkkinoille tarjoamansa kapasiteetin. Tuntimarkkinoilla korvaus kapasiteetista määräytyy tuntikohtaisesti kalleimman hyväksytyt tarjouksen mukaan, ja tarjoukset hyväksytään tarpeen mukaan hintajärjestyksessä halvimmasta aloittaen. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi n.d.)

Taajuusohjatun käyttöreservin vuosimarkkinahinta vuonna 2022 on ollut 12,24 €/MWh ja vuonna 2023 on 19,10 €/MWh. Vuonna 2024 vuosimarkkinahinta tulee olemaan 25,39 €/MWh. Fingridin vuosimarkkinoille hankkima reservimäärä vuonna 2022 oli 102,8 MW, vuonna 2023 on 67,7 MW ja vuonna 2024 tulee olemaan 67,5 MW. Tuntimarkkinoilla vuonna 2022 hinnan keskiarvo oli 37,56 €/MWh. Tuntimarkkinahinnan minimi oli 0,90 €/MWh ja maksimi 300 €/MWh. Reservin määrä tuntimarkkinoilla yksittäisellä tunnilla oli enimmillään

73 MW ja vuoden 2022 keskiarvo oli 24 MW. Vuonna 2023 (18.11.2023 mennessä) tuntimarkkinoiden hinnan keskiarvo on 48,77 €/MWh, minimi 2,50 €/MWh ja maksimi 450 €/MWh. Tuntimarkkinoilta hankittu reservi yksittäiselle tunnille on ollut enimmillään 94 MW ja keskiarvo on 46 MW. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi... n.d.)

Kapasiteettikorvaus FCR-N-markkinoilla on ylläpidetyn reservikapasiteetin ja FCR-N vuosi- tai tuntimarkkinahinnan tulo, josta vähennetään mahdolliset toimittamatta jääneestä kapasiteetista aiheutuvat sanktiot. Sanktion suuruus on toimittamattoman reservikapasiteetin ja FCR-N vuosi- tai tuntimarkkinahinnan tulo kerrottuna kolmella. Sanktiota ei kuitenkaan määrätä, mikäli kyseessä on ylivoimainen este, joka voi olla esimerkiksi ennakoimaton laitevika. Kapasiteettikorvauksen lisäksi FCR-N-markkinoilla maksetaan myös säätöenergiasta, joka on aktivoitumisesta aiheutunut kumulatiivinen energia erikseen ylös- ja alassäädölle. Säätöenergia lasketaan kertomalla reaaliaikamittauksilla todennettu taajuusohjatun käyttöreservin määrä keskimääräisellä ali- tai ylitaajuuspoikkeamalla sekä taseselvitysjakson pituudella (0,25 h). Saatu tulo jaetaan 0,1 Hz:llä. Saatu ylös- tai alassäätöenergia kerrotaan ylös- tai alassäätöhinnalla, joka määräytyy manuaalisen taajuuden palautusreservin mFRR mukaisesti. Ylössäätöenergian tapauksessa Fingrid maksaa tasevastaavalle ja alassäätöenergian tapauksessa Fingrid veloittaa tasevastaavalta energiamaksun. (Ehdot ja edellytykset taajuuden... 2023.)

Ylössäätöhinta määräytyy kalleimman tilatun ylössäätötarjouksen mukaan, kuitenkin vähintään vuorokausimarkkinoiden Suomen talousalueen kyseisen tunnin hinta. Alassäätöhinta määräytyy halvimman tilatun alassäätötarjouksen mukaan, rajoittuen enimmillään vuorokausimarkkinoiden Suomen talousalueen kyseisen tunnin hintaan. (Ehdot ja edellytykset manuaalisen... 2023.)

3.2.2 Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D

Taajuusohjattu häiriöreservi on jaettu kahteen tuotteeseen, FCR-D ylös ja FCR-D alas. Ne pyrkivät pitämään taajuuden 49,5–50,5 Hz alueella, aktivoituen kuitenkin vasta, kun taajuus poikkeaa normaalialueelta (49,9–50,1 Hz). Ylössäätö

on sähköjärjestelmän taajuuden nostamista lisäämällä tuotantoa tai vähentämällä kulutusta ja alassäätö on taajuuden laskemista vähentämällä tuotantoa tai lisäämällä kulutusta. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi n.d.)

Taajuusohjattua häiriöreserviä ylläpidetään pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä suurimman yksittäisen vian suuruuden mukaan niin, ettei sen vika aiheuta suurempaa kuin 0,5 Hz pysyvää poikkeamaa sähköjärjestelmässä. FCR-D ylös tarve on 1450 MW ja FCR-D alas tarve on 1400 MW. Fingridin velvoite on FCR-D ylös -tuotteelle noin 290 MW ja FCR-D alas -tuotteelle 230 MW. Molempia tuotteita hankitaan FCR-N-reservituotteen tapaan sekä vuosimarkkinoilta että tuntimarkkinoilta. Vuosi- ja tuntimarkkinoille osallistuminen toimii samalla tapaa kuin FCR-N-reservituotteella. Fingrid kattaa taajuusohjattujen häiriöreservien ylläpidon kantaverkkotariffilla. (Reservimarkkinat n.d.)

FCR-D-reservituotteista maksetaan ylläpidetystä kapasiteetista. Reservituotteisiin voi osallistua vähintään 1 MW reservillä. Sen ohjaus toimii samoin kuin FCR-N-reservituotteella, eli paikallisen taajuusmittauksen perusteella. FCR-D-reservi-kohteen vähimmäismitoitus yhtäjaksoiselle aktivoinnille täydellä teholla on 20 minuuttia. Vähimmäismitoituksen mukaan FCR-D-reservin tulisi olla siis teholtaan 1 MW ja kapasiteetiltaan noin 0,33 MWh. Sähköenergiavarasto soveltuu hyvin FCR-D-reservituotteille, koska reservien aktivointi on lyhytkestoista. Reservin aktivointi tapahtuu alle 10 sekunnissa. Sähköenergiavaraston osallistuessa FCR-D-reserviin tulee siitä seurata varaustasoa reaaliaikaisesti. (Reservituotteet ja markkinapaikat 2023.)

Taajuusohjatun häiriöreservin ylössäätötuotteen vuosimarkkinahinta on vaihdellut 1,48–4,70 €/MWh välillä vuosina 2011–2024. Vuodelle 2024 vuosimarkkinahinta on 4,00 €/MWh. Vuosimarkkinoilla käytettävissä oleva enimmäismäärä on ollut 244,3–458,3 MW vuosina 2011–2024. Vuodelle 2024 vuosimarkkinalla hankittu käytettävissä oleva enimmäismäärä on 347,8 MW. Tuntimarkkinoilla ylössäädön hinta on ollut 0,75–560,00 €/MWh välillä ja keskiarvo oli 13,63 €/MWh vuonna 2022. Tuntimarkkinoilta hankittu ylössäädön määrä vuonna 2022 oli 0–169 MW välillä, keskiarvolla 43 MW. Vuonna 2023 ylössäädön tuntimarkkinahinta on ollut 0,30–600 €/MWh välillä, keskiarvolla 29,80 €/MWh, sekä hankittu

määrä tuntimarkkinoilta 0–173 MW välillä, keskiarvolla 69 MW (21.11.2023 mennessä). (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi... n.d.)

FCR-D alas -reservituotetta on hankittu vuodesta 2022 alkaen. Vuosimarkkinahinta on ollut vuonna 2022 10,00 €/MWh ja vuonna 2023 on 9,99 €/MWh. Vuoden 2024 vuosimarkkinahinta tulee olemaan 9,50 €/MWh. Vuosimarkkinoiden enimmäismäärä vuonna 2022 oli 114,4 MW ja vuonna 2023 on 186,4 MW. Vuonna 2024 vuosimarkkinoille hankittu enimmäismäärä tulee olemaan 245,2 MW. Tuntimarkkinoilla FCR-D hinta on ollut vuonna 2022 0,90–285,00 €/MWh välillä, keskiarvolla 28,92 €/MWh. Hankintamäärät vuonna 2022 olivat 0–77 MW, keskiarvolla 19 MW. Vuonna 2023 tuntimarkkinoilla FCR-D alas -reservituotetta on hankittu 21.11.2023 mennessä 0–146 MW, keskiarvolla 46 MW ja tuntimarkkinahinta on ollut 1,00–250,00 €/MWh välillä, keskiarvolla 15,86 €/MWh. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi... n.d.)

3.2.3 Nopea taajuusreservi FFR

Nopea taajuusreservi on otettu käyttöön vuonna 2020 Pohjoismaissa, ja sitä hankitaan pienen inertian tilanteissa, jolloin sähköjärjestelmän pyöriin massoihin varastoituneen liike-energian kyky vastustaa taajuuden muutoksia on pieni. Tarvittava reservin määrä riippuu vian suuruudesta ja sen hetkisen inertian määrästä. (Nopea taajuusreservi n.d.)

Reservikohteet aktivoidaan automaattisesti taajuusmittausten perusteella ja niiden tulee pystyä aktivoitumaan täysimääräisesti vähintään 1,3 sekunnin kuluessa, kun taajuus tippuu 49,7 hertsiin. Nopeimmillaan reservikohteen tulee aktivoitua, kun taajuus on 49,5 Hz. Tällöin aktivointinopeuden tulee olla 0,7 sekuntia. Jos deaktivointinopeus on yli 20 % reservikohteen kapasiteetista per sekunti, vähimmäiskesto on 20 sekuntia. Deaktivointinopeuden ollessa alle 20 % sekunnissa, on vähimmäiskesto viisi sekuntia. Uusi aktivointi tulee olla mahdollista 15 minuutin kuluessa edellisestä aktivoinnista. Nopeaa taajuusreserviä hankitaan vain osalle tunneista, ja reservin hankita painottuu keväälle, kesälle ja syksyyn. (Nopea taajuusreservi n.d.)

Nopeaan taajuusreserviin voi osallistua tuntimarkkinalla. Kunkin tunnin hinta määräytyy kalleimman kyseiselle tunnille hyväksytyyn tarjouksen mukaan. Nopeaan taajuusreserviin voi osallistua myös yhteistarjouksella, jolloin sama reservikohte voi osallistua FCR-D ylös -reserviin sekä FFR-reserviin. Tämä mahdollistaa joustavan osallistumisen molempiin reservituotteisiin niihin soveltuvalla reservikohteella. (Nopea taajuusreservi n.d.)

Minimitarjouskoko FFR-reservituotteelle on 1 MW ja aktivoituessa vähimmäiskesto on 5–30 sekuntia. Kapasiteetin tarve on hyvin pieni suhteessa tehoon, joten sähköenergiavarasto soveltuu hyvin FFR-reservikohteeksi. Reservikohteelle maksetaan korvausta ylläpidetystä kapasiteetista ja Fingrid kattaa nopean taajuusreservin kustannukset kantaverkkotariffilla. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2023.)

Vuonna 2021 nopeaa taajuusreserviä hankittiin tunnissa 0–62 MW verran, keskiarvolla 3 MW. Hinta oli 11–100 €/MW ja keskiarvo 40 €/MW. Vuonna 2022 hankintamäärä tunnissa vaihteli 0 MW ja 50 MW välillä ja keskiarvo oli 3 MW. Hinta vaihteli välillä 10–99 €/MW ja keskiarvo oli 29 €/MW. Vuonna 2023 nopeaa taajuusreserviä on hankittu tunnille 0–49 MW välillä, keskiarvolla 2 MW. Hinta on vaihdellut 1–100 €/MW välillä. Keskiarvo tuntihinnalle vuonna 2023 (22.11.2023 mennessä) on ollut 39 €/MW. (Reservimarkkinainformaatio, nopea taajuusreservi n.d.)

3.2.4 Taajuuden palautusreservi FRR

Taajuuden palautusreservit, eli automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR ja eri säätösähköreservituotteet mFRR ovat hitaammin aktivoituvia suuren kapasiteetin reservituotteita. aFRR-markkinoilla minimitarjouskoko on 1 MW ja vähimmäismitoitusaika on yksi tunti. Reservituotteita, joita mFRR- ja aFRR-reservituotteille osallistuu, ovat pääasiassa vesivoima, lämpövoima, teollinen kulutus ja tuulivoima. Minimitarjousmäärä säätösähkömarkkinoilla on 1 tai 5 MW ja vähimmäismitoitusaika on yksi tunti. Säätökapasiteettimarkkinoilla vähimmäismitoitusaika on kolme tuntia. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat, 2023.)

Automaattisen taajuuden palautusreservin kustannukset Fingrid kattaa tasepalvelutariffilla, ja mFRR-reservituotteista säätökapasiteettimarkkinoiden, Fingridin omien varavoimalaitoksien sekä käyttöoikeuslaitosten kustannukset katetaan 80 prosenttisesti tasepalvelutariffilla ja 20 prosenttisesti kantaverkkotariffilla. Taajuuden palautusreservien vaatimat suuret tehot sekä kapasiteetit eivät sovellu hyvin sähköenergiavarastoille. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2023.)

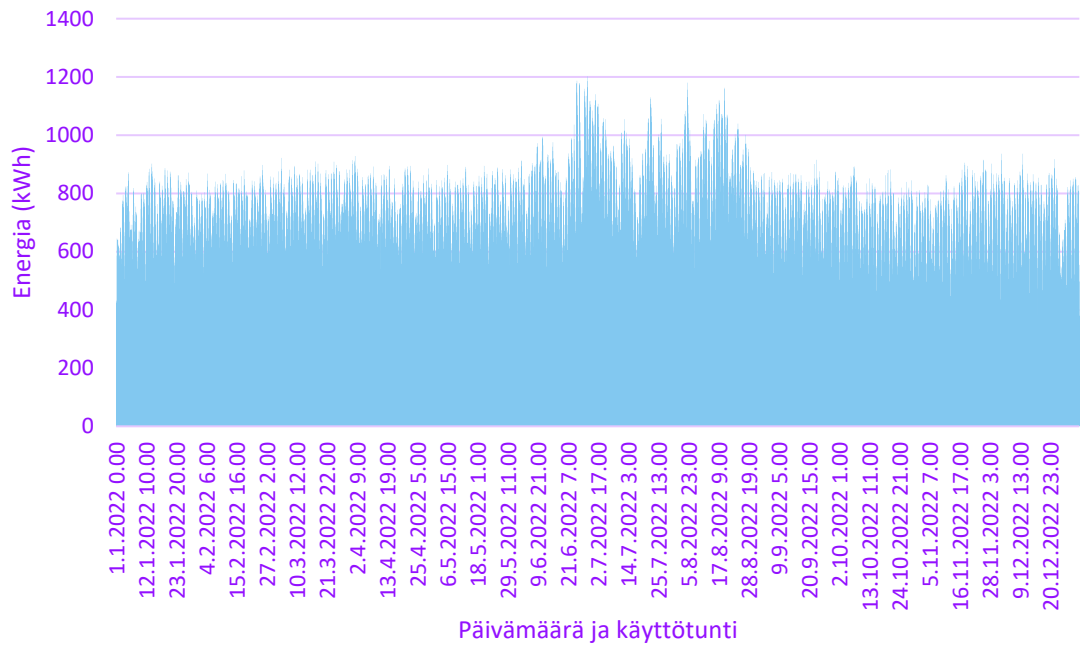
4 SÄHKÖENERGIAVARASTON MITOITUS

4.1 Referenssikohteen tekniset tiedot ja kulutusprofiili

Sähköenergiavaraston liittämistä tarkasteltiin Lahdessa sijaitsevaan hypermarkettiin. Se on liittynyt Lahti Energia Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkkoon kahdella 1600 kilovolttiampeerin (kVA) muuntajalla. Kohteessa on 2500 ampeerin pääkeskus ja 2500 ampeerin varavoiman pääkeskus. Kohteessa on dieselkäyttöinen 1250 kVA varavoimakone. Aurinkosähkötuotantoa kohteeseen on asennettu 940 kW huipputeholla ja sähköautojen lataustehoa kohteessa on yhteensä 520 kW. Kohteessa ei ole asennettuja akustojärjestelmiä, lukuun ottamatta keskeytymätöntä tehonsyöttöjärjestelmää.

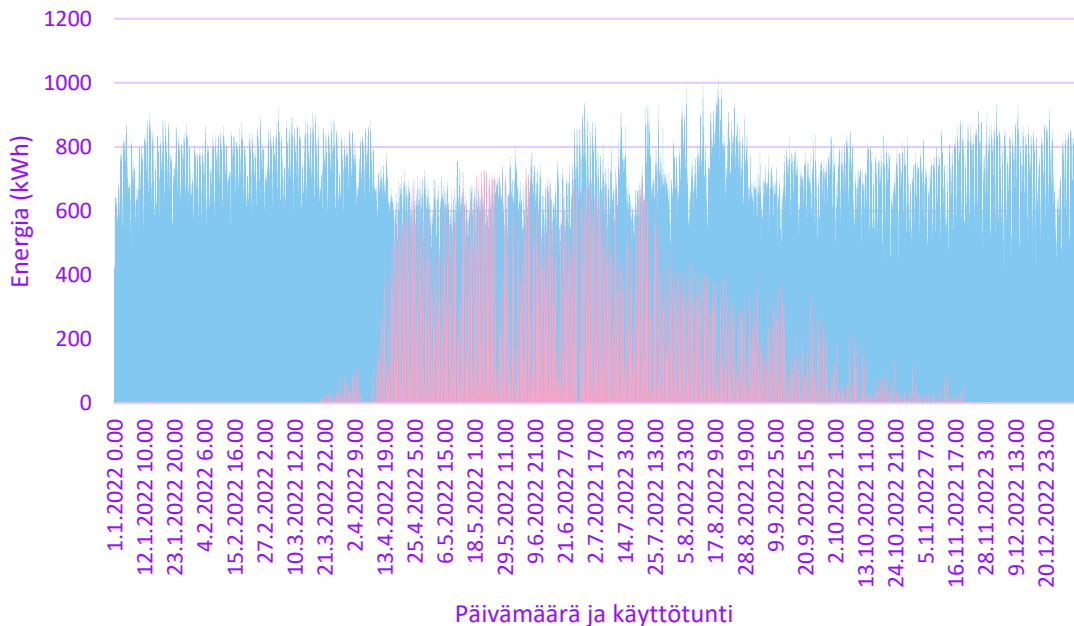
Kohteesta oli tarkastelua varten saatavilla vuoden 2022 energianmittaustiedot sekä aurinkosähkötuotannon mittaustiedot. Energianmittaustietojen mukaan yksittäisen tunnin pienin verkosta otettu energiamäärä oli 3 kWh ja suurin oli 738 kWh. Koska kohteessa ei ollut akustoa ja vuoden joka tunnilla verkosta siirrettiin kiinteistöön energiaa, kiinteistö kulutti kaiken tuottamansa aurinkosähköenergian. Tämän perusteella laskettiin kiinteistön kokonaiskulutus laskemalla yhteen verkosta kiinteistöön siirretyn energian määrä ja aurinkosähkövoimalan tuottaman energian määrä yhteen jokaiselle vuoden tunnille. Yksittäisen tunnin suurin kulutus oli 1202 kWh ja pienin kulutus oli 258 kWh. Koko vuoden energiankulutus oli noin 6 GWh (gigawattituntia) ja tunnin kulutuksen keskiarvo oli 691 kWh.

Vuoden 2022 joka tunnille laskettu kokonaiskulutus näkyy kuviossa 3. Kuvion perusteella nähdään kulutuksen olevan tasaista vuodenajasta riippumatta, ja kulutushuiput painottuvat kesäkuukausille.



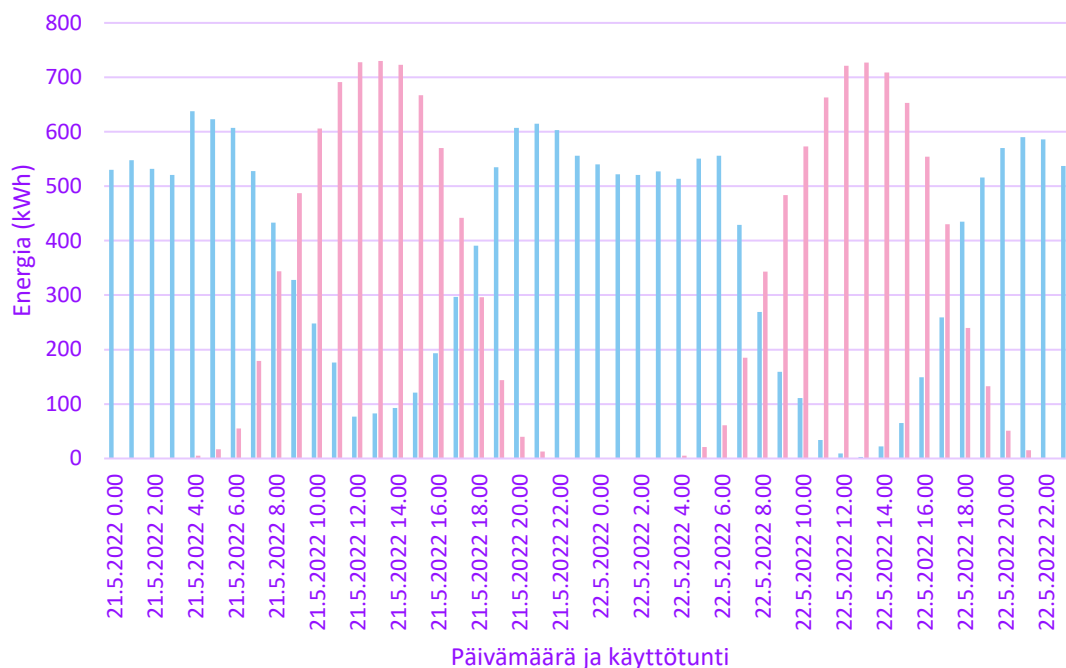
KUVIO 3. Kohteen kokonaiskulutus tunneittain vuonna 2022.

Kuviossa 4 näkyy verkosta kiinteistöön siirretyn energian määrä tunneittain vuoden 2022 ajalta sinisellä, sekä aurinkosähkön tuotanto tunneittain vuonna 2022 vaaleanpunaisella. Aurinkosähkön tuotanto on korkeimmillaan huhtikuusta heinäkuuhun.



KUVIO 4. Kohteen verkosta kiinteistöön siirretty energiamäärä (sininen) ja aurinkovoimalan tuotanto (vaaleanpunainen) tunnissa vuodelta 2022.

Kuviossa 5 on kuvattu tarkemmin kahden vuorokauden verkosta kiinteistöön siirrettyä energiaa (sinisellä) sekä aurinkosähkön tuotantoa (vaaleanpunaisella) toukokuussa 2022. Kuvio kuvastaa hyvän aurinkosähkön tuotannon vuorokausia, ja siitä huomataan, että aurinkosähkön tuotanto kattaa lähes täysin kiinteistön sähkönkulutuksen keskipäivän ja alkuiltapäivän aikana.



KUVIO 5. Kohteen kahden toukokuuisen vuorokauden verkosta kiinteistöön siirretty energia (sininen) ja aurinkosähkön tuotanto (vaaleanpunainen) tunnissa vuonna 2022.

4.2 Sähköenergiavaraston hyödyntämismahdollisuudet

Hyödyntämismahdollisuuksia tarkasteltiin kiinteistön teknisten tietojen ja kulutus-tietojen perusteella. Tavoitteena oli tarkastella varavoimakäyttöä sähköenergiavarastolla, jotta hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää myös varavoimatilan-teissa. Hyödyntämismahdollisuuksiksi nousi hinnanvaihtelun hyödyntäminen ja huipputehon leikkaus. Öisin kiinteistö kulutti vähemmän energiaa kuin päivisin, joten yöllä sähköenergiavarastoa voitaisiin ladata ja sitä voitaisiin purkaa kulutuk-sen huipputunteina.

Sähköenergiavarasto mahdollistaa sähköverkon tukemisen osallistumalla reservimarkkinoille. Uusiutuvien energianlähteiden omakäyttöasteen lisäyksestä kohteessa on rajallisemmin hyötyä jo valmiiksi korkean omakäyttöasteen takia.

4.3 Sähköenergiavaraston mitoitus eri skenaarioilla

Sähköenergiavaraston mitoitusta tarkasteltiin neljän eri skenaarion kautta. Joka skenaariossa käytettiin hinnan vaihteluna yö- ja päiväsähköä. Yösähkön hintana pidettiin 0,03 €/kWh ja päiväsähkön hintana 0,08 €/kWh. Hinnanvaihtelu oli siis 0,05 €/kWh. Yösähkön hinta oli voimassa kello 00.00–6.59 ja päiväsähkön hinta oli voimassa 07.00–23.59. Asennettavasta kapasiteetista hyödynnettiin 80 prosenttia, jotta vältettäisiin purkamasta tai lataamasta akustoa liikaa, ja siten pidentettäisiin akuston käyttöikä. Sähkövaraston vanhenemisen seuraukset toteutettiin pienentämällä käytössä olevaa kapasiteettia kaksi prosenttia vuosittain. Skenaarioissa huomioitiin myös viiden prosentin häviöt sekä ladattaessa, että purettaessa sähköenergiavarastoa. Sähköenergiavaraston edestakaiseksi hyötysuhteeksi tuli siis 90,25 %.

$$0,95 \cdot 0,95 = 0,9025 = 90,25 \%$$

Jokaisen skenaarion sähköenergiavaraston asennettava teho ja kapasiteetti, varavoimakäyttöön varattu kapasiteetti, reservimarkkinoille varattu kapasiteetti ja käyttökapasiteetti sekä hyödyntämiskohteet näkyvät taulukossa 2. Sähköenergiavaraston kokoa tai varavoimakäyttöön varattavaa kapasiteettia nostettiin joka skenaariossa. Asennettavasta kapasiteetista huomioitiin marginaalit, jonka jälkeen vähennettiin varavoimalle varattava kapasiteetti. Jäljelle jääneestä kapasiteetista vähennettiin reservimarkkinoille varattava kapasiteetti, jolloin lopulta jäi käyttökapasiteetin määrä. Varavoimakäyttöön oli varattava kapasiteettia, joka ei ole käytettävissä esimerkiksi huipputehon leikkaukseen tai hinnanvaihtelun hyödyntämiseen. Näin voitiin varmistaa sähkökatkon aikainen energian määrä vuorokauden joka hetkellä. Reservimarkkinoille osallistuttaessa myyty kapasiteetti oli varattava täysin reservituotteen käyttöön, sillä reservikapasiteetin ylläpito todennetaan mittauksen avulla. Toimittamattomasta reservistä seuraa sanktio, joka on

kolminkertainen suhteessa maksettavaan kapasiteettikorvaukseen (Ehdot ja edellytykset taajuuden... 2023, 13–17).

TAULUKKO 2. Sähköenergiavaraston mitoituksen skenaariot kohdekiinteistöön.

Skenaario	1	2	3	4
Sähkövaraston teho	200 kW	1300 kW	1300 kW	1300 kW
Sähkövaraston kapasiteetti	750 kWh	1725 kWh	2070 kWh	2070 kWh
Varavoimakäytön kapasiteetti	0 kWh	0 kWh	500 kWh	1000 kWh
Reservimarkkina-kapasiteetti	0 kWh	1000 kWh	1000 kWh	600 kWh
Käyttökapasiteetti	600 kWh	380 kWh	156 kWh	56 kWh
Sähkövaraston hyödyntämiskoh-teet	Hinnanvaihtelu, huipputehon leikkaus	Hinnanvaihtelu, reservimarkkinat	Hinnanvaihtelu, huipputehon leikkaus, varavoimakäyttö	Hinnanvaihtelu, reservimarkkinat, varavoimakäyttö

Skenaariossa 1 tarkasteltiin hinnanvaihtelun hyödyntämisen ja huipputehon leikkauksen takaisinmaksupotentiaalia pienemmän kokoluokan investoinnilla. Reservimarkkinoille osallistuminen ilman aggregointia oli skenaariossa mahdollista vain FCR-N-tuotteelle, sillä se on ainoa reservituote, johon voi osallistua 0,1 MW eli 100 kW reservillä. Varavoimakäytössä sähkövaraston teho ei olisi riittänyt tunniksi edes kohteen keskiarvokulutuksella mitoitettuna. Lisäksi huipputehon leikkauksen vaikutuksia oli vaikeampi mallintaa, kun tarkasteltiin osallistumista reservimarkkinoille, joten skenaariossa ei hyödynnetty varavoimakäyttöä tai reservimarkkinoita. Varavoimakäytön ja reservimarkkinan kapasiteeteiksi määriteltiin siis 0 kWh ja asennetusta kapasiteetista vähennettiin vain yli- ja alilatausta ehkäisevät marginaalit, eli 20 prosenttia asennetusta kapasiteetista. Käyttökapasiteetiksi jäi 600 kWh. Sähköenergiavarastona käytettiin Eatonin xStorage Compactia (Eaton n.d.).

Skenaariossa 2 tarkasteltiin reservimarkkinoille osallistumisen vaikutusta takaisinmaksuaikaan. Sähkövaraston tehonsiirtokykyä täytyi nostaa, jotta mahdollistettiin osallistuminen myös FFR- sekä FCR-D-reservituotteille, joiden minimitarjouskoko on 1 MW. Samasta syystä reservimarkkinoiden käyttöön varattiin kapasiteettia 1 MWh. Koska varavoimalle ei varattu kapasiteettia, voitiin investointikustannuksia pienentää asennettavan kapasiteetin pienemmällä mitoituksella. Asennettavasta kapasiteetista vähennettiin reservimarkkinoiden käyttöön varattu kapasiteetti ja marginaali. Käyttökapasiteetiksi jäi 380 kWh. Sähkövarastona käytettiin ABB:n eStorage Flex-40-1725 (ABB 2023).

Skenaariossa 3 tarkasteltiin kevyen varavoimakäytön kapasiteetin vaikutusta takaisinmaksuaikaan. Varavoimakäytön mitoitus oli lähempänä kiinteistön keskiarvokulutusta kuin huippukulutusta. Sähköenergiavaraston kapasiteetti oli suurempi kuin skenaariossa 2, mutta reservimarkkinakapasiteetti oli sama. Käyttökapasiteetiksi jäi marginaalien jälkeen 156 kWh. Sähkövarastona käytettiin ABB:n eStorage Flex-40-2070 (ABB 2023).

Skenaariossa 4 tarkasteltiin varavoimakäyttöön painotetun käytön vaikutusta takaisinmaksuaikaan. Varavoimakäyttö oli mitoitettu tunniksi lähes jokaisella kulutuksen hetkellä. Yksittäisten korkeimpien huipputuntien aikana varavoimakäytöllä olisi riski jäädä alle tuntiin. Lopulla kapasiteetilla osallistuttiin reservimarkkinoille mahdollisimman paljon. Minimitarkkuus reservimarkkinoilla on kuitenkin 0,1 MW, joten käyttökapasiteetiksi jäi 56 kWh. Sähkövarastona käytettiin samaa tuotetta kuin skenaariossa 3.

5 TEKNISTALOUDELLINEN TARKASTELU

5.1 Skenaario 1

Skenaariossa 1 tarkasteltiin hinnanvaihtelun hyödyntämistä sekä huipputehon leikkausta. Hintavaihtelusta saatavan hyödyn selvittämistä varten laskettiin ensin sähkövaraston lataamisen hinta. Sähkövarasto ladattiin täyteen öisin, jolloin sähkön hinta oli 0,03 €/kWh ja sähkövarastoon mahtui energiaa 600 kWh. Latauksen hyötysuhde oli 95 prosenttia, joten sähkövaraston käyttökapasiteetin täyteen lataamiseen ostettiin 631,6 kWh energiaa. Tämä kerrottiin yösähkön hinnalla 0,03 €/kWh, jolloin saatiin latauksen hinnaksi 18,90 €. Kun sähkövaraston käyttökapasiteetti purettiin päiväsähkön aikana kiinteistön käyttöön, saatiin 95 prosentin hyötysuhteella sähkövarastosta kiinteistön käyttöön 570,0 kWh. Sähkövaraston käytöstä syntyy säästöä, koska verkosta ei tarvitse ostaa energiaa päiväsähkön hinnalla. Säästön suuruus voitiin laskea kertomalla sähkövarastosta kiinteistöön siirretty energia päiväsähkön hinnalla 0,08 €/kWh. Säästön suuruus on 45,6 €. Kun säästöstä vähennettiin latauksen hinta, saatiin selville hinnanvaihtelun hyödyntämisestä muodostuvat säästöt päivässä, jonka suuruus on 26,65 €. Vuoden säästöt ovat noin 9 700 €. Tulevien vuosien säästöjen arvioinnissa sähkövaraston vanheneminen huomioitiin vähentämällä ensimmäisen vuoden jälkeä vuosisäästön suuruudesta kaksi prosenttia. Tällöin kymmenen vuoden säästöt hinnan vaihtelusta ovat noin 88 500 € ja 15 vuoden säästöt 125 000 €.

Huipputehon leikkausta mallinnettiin liitteen 1 mukaisella taulukolla. Taulukkoa varten energiamittaustiedoista laskettiin jokaisen kuukauden keskiarvopäivä, lasquemalla esimerkiksi tammikuun jokaisen päivän kello 1 alkavan käyttötunnin kulutusten keskiarvo, toistaen sama kaikille vuorokauden 24 käyttötunnille.

Jokaiselle käyttötunnille syötettiin manuaalisesti sähkövaraston lataustieto ja purkutieto, joilla tasoitettiin verkosta kiinteistöön siirrettävän energiamäärän huippuja. Viereiselle sarakkeelle kirjattiin sähkövaraston lataustason tilanne, jotta ei poikettu käyttökapasiteettialueelta. Tarkastelu tehtiin koko vuodelle, ja taulukosta etsittiin vuoden suurin yksittäinen verkosta kiinteistöön siirretty kulutushuippu,

jota käytettiin sähkönsiirtomaksun määrittämisessä. Keskiarvopäivistä muodostuneen vuoden verkosta otetun energian huippu oli 829,39 kWh ilman sähkövarastoa ja sähkövaraston kanssa se oli 740,52 kWh. Joka tunnilta verkosta otettu energiamäärä ja verkosta otettu sähkövaraston muuntama energiamäärä kerrottiin tarkasteltavan kuukauden vuorokausien määrällä ja Lahti Energia Sähköverkon verkkopalveluhinnaston keskijännite-tehosiirron mukaisella siirtomaksulla 0,0093 €/kWh (Lahti Energia n.d.). Kaikkien vuoden käyttötuntien siirtomaksujen summasta ilman sähkövarastoa vähennettiin kaikkien vuoden käyttötuntien siirtomaksujen summa sähkövaraston kanssa. Lisäksi laskettiin perus- ja tehomaksut ilman sähkövarastoa ja sähkövaraston kanssa. Perusmaksuun 62 €/kk lisättiin tehomaksu 3,91 €/kW/kk kerrottuna verkosta otetulla huipulla. Perusmaksun ja tehomaksun summa kerrottiin 12 kuukaudella, johon lisättiin aiemmin lasketut siirtomaksut, jolloin saatiin vuoden sähkönsiirtomaksut energiavarastolla ja ilman. Summista laskettiin erotus, jonka tulos on vuoden säästö huipputehonleikkauksesta.

Huipputehonleikkauksesta säästyy sähkönsiirtomaksuista vuodessa noin 2 900 €. Sähkövaraston vanheneminen huomioitiin samalla tavalla kuin sähkönhintavaihteluiden hyödyntämisen kohdalla, ja kymmenen vuoden säästöt ovat noin 26 600 € ja 15 vuoden säästöt noin 37 600 €. Yhteensä hinnanvaihtelun hyödyntämisestä ja huipputehon leikkaamisesta säästyy 163 000 € 15 vuodessa.

Valmistajien haastatteluiden perusteella Verkostomessuilla vuonna 2023 tammi-kuussa 1 MWh asennuskapasiteetin sähkövaraston hintaluokaksi on arvioitu 600 000 €. Tällöin 750 kWh sähkövaraston hinta olisi 450 000 €. Takaisinmaksuaika voidaan laskea jakamalla sähkövaraston hinta 15 vuoden säästöjen yhden vuoden keskiarvolla.

$$\frac{450\,000\ \text{€}}{\frac{163\,000\ \text{€}}{15}} = 41,38\ \text{a}$$

Takaisinmaksuaika on noin 41 vuotta. Investointi ei ole teknis-taloudellisesti kannattava. Taulukossa 3 on yhteenveto skenaarion 1 tuloksista.

TAULUKKO 3. Skenaarion 1 säästöt yhden, kymmenen ja 15 vuoden aikana, sähköenergiavaraston hinta ja takaisinmaksuaika.

Säästö yhdessä vuodessa	12 600 €
Säästö kymmenessä vuodessa	115 000 €
Säästö 15 vuodessa	163 000 €
Sähköenergiavaraston hinta	450 000 €
Takaisinmaksuaika	41 vuotta

5.2 Skenaario 2

Skenaariossa 2 hinnanvaihtelun hyödyntäminen laskettiin samalla tavalla kuin skenaariossa 1. Käyttökapasiteettia oli 380 kWh, joten vuoden säästöt ovat noin 6 200 €, kymmenen vuoden säästöt noin 56 000 € ja 15 vuoden säästöt noin 79 500 €.

Skenaariossa tarkasteltiin reservimarkkinoille osallistumista tarkemmin. Reservituotevaihtoehtoja sähkövarastolle ovat FFR, FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas. Joka reservituotteesta haettiin vuodelta 2022 tiedot tuntimarkkinoiden hankintamääristä, tuntimarkkinahinnat sekä vuosimarkkinasuunnitelmat joka tunnille. Sama tehtiin myös vuoden 2023 joka tunnille aikavälillä 1.1.2023–20.11.2023. Tuntimarkkinahinnat järjestettiin Excelissä suuruusjärjestykseen suurimmasta pienimpään laskennan yksinkertaistamiseksi.

Koska sähkövarastoa voidaan ladata yösähköllä 30 €/MWh hintaan, tarkasteltiin reservimarkkinoiden tuottoa tuntimarkkinoilta, kun tarjoushinta oli 30 €/MWh. Tarjouskokona käytettiin 1 MW, paitsi FCR-N-markkinoilla, jolla käytettiin 0,5 MW tarjouskokoa symmetrisen säädön vaatiman kapasiteettitarpeen takia. Koska tuntimarkkinoilla käyttötunnin hinta määräytyi korkeimman hyväksytyt tarjouksen mukaan ja tarjoukset hyväksytään hintajärjestyksestä halvimhasta aloittaen, saatiin valtaosasta tunneista enemmän kuin 30 €/MWh ylläpidetystä kapasiteetista. Vastaavasti tunneilta, joiden hintataso oli alle 30 €/MWh, jäi tarjous hyväksymättä. Tuntimarkkinoiden tuottolaskelmissa on oletettu, että tuntimarkkinoille jätetty tarjous hyväksytään, jos tuntimarkkinahinta on 30 €/MWh tai yli.

Tuntimarkkinahinnat summattiin niiden tuntien osalta, joiden hinnat olivat vähintään 30 €/MWh. Näin saatiin koko vuoden korvaus tuntimarkkinoilta. Tulokset on esitetty taulukossa 4. Taulukossa näkyy eri reservituotteiden tuntimarkkinoiden tuotot vuodelta 2022 sekä päivämäärään 20.11. mennessä vuodelta 2023. Lisäksi molempien vuosien tuottojen perusteella laskettiin keskiarvot kaikille reservituotteille. Molempien vuosien summat lisättiin keskenään reservituotekohtaisesti, ja jaettiin se kuluneiden kuukausien määrällä, eli 22,5 kuukaudella, koska vuoden 2023 otanta on otettu kesken vuoden. Tulos kerrottiin 12:lla, jolloin saatiin keskimääräisen vuoden reservituotot tuntimarkkinoilta reservituotekohtaisesti.

TAULUKKO 4. Reservituotteiden tuntimarkkinatuotot vuosina 2022, 2023 ja niiden vuosien kuukausipainotettuna keskiarvona.

Reservituote	2022	2023	Keskiarvo/vuosi
FFR	33 000 €	34 800 €	36 100 €
FCR-N	126 200 €	163 000 €	154 200 €
FCR-D ylös	92 900 €	190 400 €	151 100 €
FCR-D alas	150 000 €	71 800 €	118 300 €

Reservituotteista vuosien 2022 ja 2023 otannalla FCR-N olisi tasaisin ja keskiarvoltaan tuottavin reservituote tuntimarkkinoilla. FCR-N on kuitenkin reservituotteista myös aktiivisin, sillä se säätää taajuutta jatkuvasti normaalialueella, mikä tarkoittaa sitä, että reservituote aktivoituu usein ja siirtää tehoa molempiin suuntiin. Näissä laskelmissa ei ole otettu huomioon säätösähkön hintaa. Muissa reservituotteissa maksetaan vain ylläpidetystä kapasiteetista, ja ne aktivoituvat vasta, kun taajuus poikkeaa normaalialueelta 49,9–50,1 Hz. Tämä tarkoittaa sitä, että muilla reservituotteilla kuin FCR-N on todennäköisempää saada korvaus ylläpidetystä kapasiteetista ilman, että reservi aktivoituu lainkaan.

FCR-reservituotteisiin voi osallistua myös vuosimarkkinoilla. Vuosimarkkinoilla on kiinteä hinta vuoden joka tunnille, joka määrittyy syksyn tarjouskilpailussa korkeimman hyväksytyt tarjouksen myötä. Vuosimarkkinoilta hankitaan lähes joka tunti reserviä. Laskelmat on suoritettu koko vuoden pysyvyydellä, sillä Fingridin avoimen datan mukaan siitä on näyttöä historiasta. Vuosimarkkinoiden tuotot

vuosina 2022–2024 sekä niiden keskiarvot ovat esitetty taulukossa 5. FFR-reservituote on ainoa, jolle ei voi osallistua vuosimarkkinoilla. Kun taulukon 5 keskiarvoja verrattiin, olivat FCR-N-vuosimarkkina tai FCR-D alas -vuosimarkkina tuottavimmat vaihtoehdot.

TAULUKKO 5. Taajuuden vakautusreservien (FCR) vuosimarkkinoiden tuotot vuosina 2022–2024 ja niiden keskiarvo.

Vuosi	FCR-N	FCR-D ylös	FCR-D alas
2022	53 600 €	16 600 €	87 600 €
2023	83 700 €	24 600 €	87 500 €
2024	111 200 €	35 000 €	83 200 €
Keskiarvo	82 800 €	25 400 €	86 100 €

Näistä vaihtoehdoista valittiin FCR-N-tuntimarkkina sen pienimmän minimitarjoukseen takia. Tämä mahdollistaa reservituotteeseen joustavamman osallistumisen sähkövaraston ikääntyessä, vaikka akustojen kapasiteetti pienenesi. Akuston kapasiteettihäviöt huomioitiin samaan tapaan kuin skenaariossa 1 hinnanvaihtelun hyödyntämisen laskelmissa.

Reservimarkkinoille (FCR-N) osallistuminen tuotti kymmenessä vuodessa 1 400 000 € ja 15 vuodessa 1 990 000 €. Hinnanvaihtelun hyödyntämisellä säästettiin vuodessa 6 200 €, kymmenessä vuodessa 56 100 € ja 15 vuodessa 79 500 €. Sähkövaraston hankintahinta oli 1 035 000 € ja takaisinmaksuaika 7,5 vuotta. Investoinnilla on hyvät todennäköisyydet olla teknistaloudellisesti kannattava.

5.3 Skenaario 3

Skenaariossa 3 reservimarkkinoille osallistuttiin samalla kapasiteetilla kuin skenaariossa 2, joten reservimarkkinoilta saatava tuotto pysyi samana. Hintavaihtelun hyödyntäminen 156 kWh käyttökapasiteetilla säästäisi vuodessa 2 500 €, kymmenessä vuodessa 23 000 € ja 15 vuodessa 32 600 €. Varavoiman hyödyntämisestä ei ollut saatavilla varsinaista numeerista arvoa, sillä säästöt varavoi-

masta muodostuvat esimerkiksi sähkökatkon aikaisten pilaantumattomien tuotteiden arvosta. Varavoiman arvotus on siis enemmän kiinni kiinteistön omistajan tai käyttäjän näkemyksestä.

Varavoimakäytön takia sähkövaraston asennettavaa kapasiteettia nostettiin skenaariosta 2. Skenaariossa 3 sähkövaraston hinta oli 1 242 000 € ja sen takaisinmaksuaika on 9,2 vuotta. Hintavaihtelun hyödyntämisen osuus takaisinmaksussa oli 1,6 prosenttia. Takaisinmaksuaika pelkällä reservimarkkinalla on 9,4 vuotta, eli varavoimakäyttöön olisi varattavissa 656 kWh ja se ei pidentäisi merkittävästi takaisinmaksuaikaa. Investoinnilla on realistiset mahdollisuudet maksaa itsensä takaisin.

5.4 Skenaario 4

Skenaariossa 4 tarkasteltiin tilannetta, jossa varavoimakäytön mitoitus on suurempi. Reservimarkkinan osuutta pienennettiin niin, ettei se käy ilman aggregointia kuin FCR-N-markkinoille. Käyttökapasiteetin määrä minimoitiin ja käytettiin kaikki loput varavoimalta jääneestä kapasiteetista reservimarkkinaan.

Hinnanvaihtelun hyödyntämisellä säästyy vuodessa 900 €, kymmenessä vuodessa 8 300 € ja 15 vuodessa 11 700 €. Reservimarkkinalla FCR-N-tuotteella 0,3 MW tarjouskoolla tuotettiin vuodessa 92 500 €, kymmenessä vuodessa 842 200 € ja 15 vuodessa 1 200 000 €. Laskelmissa otettiin samaan tapaan huomioon akuston kapasiteetin pienentyminen kuin aiemmissa skenaarioissa. Sähkövaraston hinta on 1 242 000 € ja takaisinmaksuaika 15,5 vuotta. Sähköenergiavarastojen eliniän voidaan olettaa olevan korkeintaan 15 vuotta, joten investoinnilla on huonot todennäköisyydet olla teknistaloudellisesti kannattava. Pienet syklimäärät ja matalat purkauksien syvyydet voivat kuitenkin auttaa pidentämään akuston elinikää.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää sähköenergiavaraston hyödyntämismahdollisuuksia kiinteistöissä ja tarkastella niiden mitoitusta teknistaloudellisesta näkökulmasta. Työssä esiteltiin kohdekiinteistölle mahdollisia toimintoja, joita sähköenergiavarastolla voisi toteuttaa. Tuloksena saatiin takaisinmaksuajaltaan optimoituja ratkaisuja, jotka mahdollistavat myös sähköenergiavaraston varavoimakäytön. Saadut tulokset ovat kuitenkin vain viitteellisiä, sillä niissä ei ole huomioitu asennuksesta ja ylläpidosta aiheutuvia kustannuksia. Tästä aiheutuvaa virhettä tasapainottaa kuitenkin se, että laskennassa on käytetty hintahaarukan korkeampaa arviota.

Työssä vertailtiin neljää eri mitoituskenaariota. Ensimmäisessä skenaariossa tarkasteltiin hinnanvaihtelun hyödyntämisen ja huipputehon leikkauksen mahdollisuuksia, ja takaisinmaksuajaksi saatiin 41 vuotta. Toisessa skenaariossa tarkasteltiin reservimarkkinoille osallistumista hinnanvaihtelun hyödyntämisen ja huipputehon leikkauksen lisäksi. Takaisinmaksuajaksi saatiin 7,5 vuotta. Kolmannessa skenaariossa tarkasteltiin hinnanvaihtelun hyödyntämisen, reservimarkkinoille osallistumisen ja varavoimakäytön mahdollisuuksia. Takaisinmaksuajaksi saatiin 9,2 vuotta ja ilman hintavaihtelun hyödyntämistä 9,4 vuotta. Neljännessä skenaariossa tarkasteltiin varavoimakäyttöön painotettua hyödyntämistä, ja takaisinmaksuajaksi saatiin 15,5 vuotta.

Tulosten perusteella huipputehon leikkauksella ja hinnanvaihtelun hyödyntämisellä saavutettavat hyödyt jäivät vähäisiksi, eivätkä niistä saatavat säästöt riittäneet kattamaan investointia. Tulevaisuudessa energiamurroksen vuoksi huipputehon leikkaamisen rooli voi kuitenkin kasvaa, mikäli tehomaksuja joudutaan nostamaan kulutuspiikkien ja suurempien sähköverkkoinvestointien hillitsemiseksi. Pörssisähkön hyödyntämisessä sähköenergiavarastot tarjoaisivat suurempia säästöpotentiaaleja, mutta maltillisilla hintaeroilla toteutettu sähkön hinnoittelu ei mahdollistanut sähköenergiavarastoon investoimista.

Uusiutuvien energialähteiden omakäyttöasteen parantamiseen ei tunnistettu juurikaan mahdollisuuksia. Mahdollinen jatkotutkimusaihe voisi olla aurinkovoimalan

tuotantokapasiteetin kasvattaminen sähköenergiavarastoa hyödyntäen. Tämä lisääisi omakäyttöastetta ja vähentäisi kesäaikoina verkosta kiinteistöön siirrettävän sähköenergian määrää entisestään. Lisäksi se mahdollistaisi osallistumisen reservimarkkinoille matalammilla tarjouksilla, mikä parantaisi taloudellista tuottopotentiaalia.

Reservimarkkinoille osallistuminen mahdollistaa hyvät takaisinmaksuajat sähköenergiavarastoinvestoinneille ja tukee samalla sähköjärjestelmän tilaa, kun säätykyinen tuotanto vähenee ja sääriippuvainen sähköntuotanto lisääntyy. Etenkin sähköenergiavarastojen nopea tehonsyöttökyky on tärkeää pienen inertian tilanteissa, kun inertiaa tuottavat pyörivät massat vähenevät energiamurroksen myötä.

Sähköenergiavarastojen yleistymiseen liittyy mahdollisuuksien lisäksi epävarmuustekijöitä. Energiamurros kasvattaa litiumin, koboltin ja muiden akuissa käytettävien raaka-aineiden kysyntää. Eri metallien ja muiden tärkeiden raaka-aineiden saatavuus voi tulevaisuudessa hidastaa energiarastojen yleistymistä sekä energiamurrosta. Raaka-aineiden saatavuusongelmia voidaan ratkaista esimerkiksi kiertotalouden avulla tai kehittämällä korvaavia teknologioita. (Hanski, Alakotila & Putkonen 2023.)

LÄHTEET

ABB. 2023. ABB eStorage Flex 40. Tuoteseloste. Viitattu 4.12.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VPD110001A0632&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Eaton. n.d. xStorage Compact. Verkkosivu. Viitattu 4.12.2023. <https://www.eaton.com/gb/en-gb/catalog/energy-storage/xstorage-compact.html>

Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle. 2023. Fingrid. Pdf-dokumentti. Viitattu 19.11.2023. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-manuaalisen-taajuuden-palautusreservin-mfrr-toimittajalle.pdf>

Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin (FCR) toimittajalle. 2023. Fingrid. Pdf-dokumentti. Viitattu 19.11.2023. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-taajuuden-vakautusreservin-fcr-toimittajalle.pdf>

Granlund. n.d. Meistä. Verkkosivu. Viitattu 6.12.2023. <https://www.granlund.fi/meista/>

Hanski, J., Ala-Kotila, P. & Putkonen, N. 2023. Kriittiset raaka-aineet – piikki Euroopan vihreän sähköistymisen lihassa? VTT 5.12.2023. Viitattu 6.12.2023. <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kriittiset-raaka-aineet-piikki-euroopan-vihrean-sahkoistymisen-lihassa>

Hoff C. M. 2022. Energy Storage Technologies and Applications. Boston: Artech House.

Lahti Energia. n.d. Hinnastot ja sopimusehdot. Verkkosivu. Viitattu 5.12.2023. <https://www.lahtienergia.fi/hinnastot-ja-sopimusehdot/>

Markkinapaikat. n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 9.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>

Nopea taajuusreservi (FFR). n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 21.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>

Reservimarkkinainformaatio, nopea taajuusreservi. n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 22.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/nopea-taajuusreservi/>

Reservimarkkinat. n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 16.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 2023. Fingrid. Pdf-dokumentti. Viitattu 22.11.2023. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

SFS-EN IEC 62485-1:2018. 2019. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 5.12.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/836916.html.stx>

SFS-EN IEC 62485-2:2018. 2018. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Paikallisakut. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 5.12.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/717980.html.stx>

SFS-EN IEC 62485-5:2021. 2022. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 5: Litiumionipaikallisakkujen turvallinen käyttö. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 5.12.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/1092334.html.stx>

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Viitattu 2.11.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset SJV2019. 2020. Fingrid. Pdf-dokumentti. Viitattu 4.12.2023. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/sahkovarastojen-jarjestelmatekniset-vaatimukset-sjv2019.pdf>

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat. n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 18.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimarkkinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/>

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). n.d. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 18.11.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saato-sahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>

Vartiainen, E. 2020. Tulevaisuuden energijärjestelmässä varastointi on avainasemassa. Fortum. Verkkosivu. Viitattu 6.12.2023. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/tulevaisuuden-energiajarjestelmassa-varastointi-avainasemassa>

