

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - YLEMPI AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN ALA

AKKUVARASTOT JA SÄHKÖKATTILAT RESERVIMARKKINOILLA

TEKIJÄ

Eetu Kumpulainen

| | |
|--|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Tutkinto-ohjelma Kehittyneet sähköenergiajärjestelmät -tutkinto-ohjelma | |
| Työn tekijä Eetu Kumpulainen | |
| Työn nimi Akkuvarastot ja sähkökattilat reservimarkkinoilla | |
| Päiväys 18.6.2025 | Sivumäärä/Liitteet 47/1 |
| Yhteistyötaho Granlund Oy | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää mahdollisuuksia osallistua Fingrid Oyj:n ylläpitämille reservimarkkinoille teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Opinnäytetyöllä pyrittiin vastaamaan kysymykseen, millaisilla järjestelmillä reservimarkkinoille voi osallistua ja mitä teknisiä vaatimuksia niiden on täytettävä. Tavoitteena oli tuottaa suunnitteluohje reservimarkkinakohteiden sähkösuunnittelun tueksi.</p> <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin reservimarkkinoihin ja eri reservimarkkinatuotteisiin Suomessa. Työssä tarkasteltiin, millä edellytyksillä reservimarkkinoille osallistuminen on mahdollista. Työssä keskityttiin erityisesti akkuvarastoihin ja sähkökattiloihin. Lisäksi laskettiin reservimarkkinoille osallistumisen kannattavuutta toteutuneiden tuntimarkkinahintojen perusteella.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena voitiin todeta, että akkuvarastot ja sähkökattilat soveltuvat hyvin säätökykyisiksi resursseiksi reservimarkkinoille niiden helpon säädettävyyden ja nopean reagointikyvyn ansiosta. Sähkösuunnittelussa on otettava huomioon etenkin reservikohteita koskevat mittalaitteiden ja tiedonsiirron vaatimukset.</p> <p>Työn tuloksena saatiin suunnitteluohje reservimarkkinakohteiden sähkösuunnittelusta Granlund Oy:n sisäiseen käyttöön. Reservimarkkinoille osallistuminen on ollut taloudellisesti hyvinkin kannattavaa viime vuosina historiatietojen valossa. Menneet hintatiedot eivät ole kuitenkaan tae tulevasta, joten uusia reservikohteita suunniteltaessa on otettava huomioon riski reserveistä maksettavien korvausten laskemisesta. Tuottojen pienemisen riskiä voi vähentää osallistumalla mahdollisimman moneen reserviin samalla järjestelmällä.</p> | |
| Avainsanat akkuvarasto, sähkökattila, reservimarkkinat | |

| | |
|---|--------------------------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | |
| Degree Programme Master's Degree Programme in Advanced Electrical Energy Systems | |
| Author Eetu Kumpulainen | |
| Title of Thesis Battery storage and electric boilers in reserve markets | |
| Date 18.June 2025 | Pages/Appendices 47/1 |
| Client Organisation /Partners Granlund Oy | |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to investigate the possibilities of participating in the reserve markets maintained by Fingrid Oyj from both technical and economic perspectives. The thesis aimed to answer the question of what kinds of systems can participate in the reserve markets and what technical requirements these systems must meet. The goal was to produce design guidelines to support the electrical design of reserve market facilities.</p> <p>The thesis explored the structure of the reserve markets and the different reserve market products available in Finland. It examined the conditions under which participation in the reserve markets is possible. The focus was specifically on battery energy storage systems and electric boilers. In addition, the economic viability of participating in the reserve markets was analyzed based on realized hourly market prices.</p> <p>The results of the thesis showed that battery storage systems and electric boilers are well-suited as controllable resources for the reserve markets due to their ease of regulation and fast response capabilities. In electrical design, particular attention must be paid to the measurement and data transmission requirements specific to reserve market systems.</p> <p>As an outcome of the thesis, a design guideline for the electrical design of reserve market systems was produced for internal use by Granlund Oy. Based on historical data, participating in the reserve markets has been economically profitable in recent years. However, past price data does not guarantee future returns, so when planning new reserve systems, the risk of declining compensation for reserves must be considered. The risk of reduced profitability can be mitigated by participating in multiple reserve markets with the same system.</p> | |
| <p>Keywords</p> <p>battery storage system, electric boiler, electricity reserve markets</p> | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 7 |
| 2 | SÄHKÖMARKKINAT SUOMESSA..... | 8 |
| 2.1 | Kulutusjousto..... | 9 |
| 2.2 | Reservi- ja säätösähkömarkkinat..... | 10 |
| 2.2.1 | Nopea taajuusreservi (FFR)..... | 12 |
| 2.2.2 | Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)..... | 14 |
| 2.2.3 | Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)..... | 16 |
| 2.2.4 | Taajuusohjattujen reservien markkinapaikat..... | 17 |
| 2.2.5 | Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)..... | 18 |
| 2.2.6 | Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)..... | 18 |
| 2.3 | Reservimarkkinoille liittyminen..... | 19 |
| 2.4 | Reserviresurssien aggregointi..... | 20 |
| 2.5 | Reservimarkkinoiden ansaintamallit..... | 21 |
| 2.6 | Reservimarkkinoiden palveluntarjoajat..... | 22 |
| 3 | LIITYNTÄPISTEEN SÄHKÖTEKNISET VAATIMUKSET..... | 24 |
| 3.1 | Kulutuksen järjestelmätekniset vaatimukset..... | 24 |
| 3.2 | Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset..... | 25 |
| 3.3 | Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset..... | 25 |
| 3.4 | Suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien järjestelmätekniset vaatimukset..... | 27 |
| 3.5 | Reservikohteen mittalaitteiden vaatimukset..... | 27 |
| 3.6 | Reservikohteen tiedonsiirron vaatimukset..... | 27 |
| 4 | RESERVIMARKKINOILLE SOVELTUVAT RESURSSIT..... | 29 |
| 4.1 | Akkuvarastot..... | 29 |
| 4.2 | Akkuvaraston liittäminen sähköverkkoon..... | 32 |
| 4.3 | Akkuvarastot reservimarkkinoilla..... | 33 |
| 4.4 | Sähkökattilat..... | 34 |
| 4.4.1 | Vastuskattilat..... | 34 |
| 4.4.2 | Elektrodikattilat..... | 34 |
| 4.5 | Sähkökattilat reservimarkkinoilla..... | 36 |
| 5 | TYÖN MENETELMÄLLINEN TOTEUTUS..... | 37 |
| 5.1 | Tutkimuksellinen kehittämistyö..... | 37 |
| 5.2 | Aineiston hankinta ja analysointi..... | 37 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6 | TULOKSET | 39 |
| 6.1 | Reservimarkkinakohteiden sähkösuunnittelu | 39 |
| 6.2 | Reservimarkkinoille osallistumisen taloudellisuus | 39 |
| 6.3 | Granlund reservimarkkinoiden palveluntarjoajana..... | 41 |
| 7 | YHTEENVETO | 43 |
| | LÄHTEET..... | 45 |
| | LIITE 1: SALASSA PIDETTÄVÄ | 48 |

KUVALUETTELO

| | | |
|----------|---|----|
| Kuva 1. | Sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet fyysisten tuotteiden osalta. (Fingrid 2025b)..... | 9 |
| Kuva 2. | Kulutusjoustop osallistuminen eri markkinapaikoille Suomessa (Fingrid 2024d). | 10 |
| Kuva 3. | Reservituotteet jaoteltuna ryhmiin käyttötarkoituksen mukaan (Fingrid 2025d)..... | 11 |
| Kuva 4. | Reservituotteiden toiminta ajan funktiona (Fingrid 2024f, 7). | 11 |
| Kuva 5. | Reservikapasiteetin hankintamäärät 2020–2030 (Mattila 2024, 19)..... | 12 |
| Kuva 6. | Reservimarkkinoille tulon vaiheet yksinkertaistetusti (Korhonen 2024, 55). | 19 |
| Kuva 7. | Itsenäinen aggregointi Fingridin reservimarkkinoilla (Fingrid 2024c)..... | 21 |
| Kuva 8. | Yhden MW:n arvo eri reservimarkkinoilla (Kakkonen 2024, 24)..... | 22 |
| Kuva 9. | Tyyppin D sähkövaraston toiminta-ajat jännite ja taajuus poikkeamissa (Fingrid 2020, 36)..... | 26 |
| Kuva 10. | Eri teknologioiden soveltuvuus reservituotteisiin (Fingrid 2023b, 6). | 29 |
| Kuva 11. | Akun purkaminen ja lataaminen (mukaillen Hazeef ym, 2024, 10)..... | 30 |
| Kuva 12. | Akkukemioiden osuudet kiinteästi asennetuissa akkuvarastoissa (Bielewski ym. 2022, 17)..... | 31 |
| Kuva 13. | Litiumioniakkujen hintakehitys vuosina 2013–2024 (BloombergNEF 2024). | 32 |
| Kuva 14. | Reservikohteen aktivointikyvyn mitoitus (Fingrid 2023b, 21)..... | 33 |
| Kuva 15. | Elektrodikattilan kuumavesijärjestelmän periaatekaavio (Parat 2025)..... | 35 |
| Kuva 16. | Elektrodikattilan höyryntuotantojärjestelmän periaatekaavio (Parat 2025). | 35 |
| Kuva 17. | Tutkimuksen ja kehittämistoiminnan risteyspaikka (Toikko ja Rantanen 2009, 21)..... | 37 |
| Kuva 18. | Potentiaaliset reservimarkkinatuotot 1 MW säätökyvyllä 2024 (Fingrid 2025e). | 39 |
| Kuva 19. | Granlundin tarjoaman reservimarkkinakonseptin vaiheet (Karvinen 2025)..... | 41 |
| Kuva 20. | Granlundin toiminta reservimarkkinoiden palveluntarjoajana (Karvinen 2025). | 42 |

TAULUKKOLUETTELO

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Nopean taajuusreservin aktivointitaajuus ja -aika (Fingrid 2023a, 5). | 13 |
| Taulukko 2. Nopean taajuusreservin aktivoinnin vähimmäiskesto (Fingrid 2023a, 5). | 13 |
| Taulukko 3. Vuosi- ja tuntimarkkinoiden periaatteelliset erot (Fingrid 2024h). | 15 |
| Taulukko 4. FCR-N reservin aktivointitaajuudet (Fingrid 2023c, 11). | 15 |
| Taulukko 5. Teho- ja energiavaatimukset FCR-N reserveille (Fingrid 2023c, 38). | 16 |
| Taulukko 6. FCR-D reservien aktivointitaajuudet (Fingrid 2023c, 11). | 17 |
| Taulukko 7. Teho- ja energiavaatimukset FCR-D reserveille (Fingrid 2023c, 38). | 17 |
| Taulukko 8. Sähkövaraston tyyppiluokittelu tehon ja jännitteen perusteella (Fingrid 2020, 8). | 25 |
| Taulukko 9. Taajuusohjattujen reservien vaatimukset pätötehomittaukselle (Alanen 2024, 148). | 27 |
| Taulukko 10. Taajuusohjattujen reservien vaatimukset taajuusmittaukselle (Alanen 2024, 148). | 27 |
| Taulukko 11. Reservikohteiden tiedonsiirtovaatimukset, vaaditut signaalit (Fingrid 2025c, 25–26). | 28 |
| Taulukko 12. Yleisimpien akkukemioiden edut ja haitat (Bielewski ym. 2022, 3; ST-käsikirja 42, 14). | 31 |
| Taulukko 13. Energiavarastojen kapasiteetti automaattisissa reserveissa (Kujansuu 2025, 4). | 34 |
| Taulukko 14. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 100 % (Fingrid 2025e). | 40 |
| Taulukko 15. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 80 % (Fingrid 2025e). | 40 |
| Taulukko 16. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 40 % (Fingrid 2025e). | 40 |

1 JOHDANTO

Sähkön kulutuksen ja tuotannon on oltava joka hetki tasapainossa. Kulutuksen ja tuotannon tasapainosta kertoo sähköverkon taajuus, joka on pohjoismaisessa sähköverkossa 50,0 Hz. Tasapainoista tuotantoa ja kulutusta pyritään suunnittelemaan etukäteen sähkömarkkinaosapuolten toimesta. Suunnittelu ei kuitenkaan kykene ennakoimaan kaikkia tilanteita sähköjärjestelmässä, joten poikkeamien hallintaan tarvitaan reservejä. Suomessa Fingrid Oyj vastaa reservien hankinnasta ylläpitämisestä markkinoilta. Reserveillä tarkoitetaan voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja, jotka kykenevät tarvittaviin tehomuutoksiin tarpeen mukaan. (Fingrid 2025d.)

Opinnäytetyössä etsitään keinoja lisätä reservimarkkinoille soveltuvaa säätävää kapasiteettia Suomen sähköjärjestelmässä. Tulevaisuudessa mahdollisimman monipuolinen kattaus säätökykyistä tuotanto-, kulutus- ja varastokapasiteettia on tarpeen. Erityisesti tässä opinnäytetyössä käsiteltävä säätökykyinen kulutus esimerkiksi sähkökattiloiden muodossa ja akkuvarastot ovat toivottuja reservejä. (Cygnel, S. 2024, 12–17.)

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia reservimarkkinoille osallistumista teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Työssä selvitetään Fingridin asettamat tekniset vaatimukset reservimarkkinatoimijoille. Tämän avulla voidaan määrittää mitä asioita on huomioitava järjestelmiä suunniteltaessa. Reservimarkkinoille osallistumisen taloudellisia hyötyjä tarkastellaan Fingridin avoimeen dataan perustuvien hintatietojen pohjalta. Tarkastelun pääpaino reservimarkkinoille soveltuvista järjestelmistä kohdistuu akkuvarastoihin ja sähkökattiloihin. Työn tavoitteena on saada aikaan riittävän kattava tietopaketti reservimarkkinoista ja reservimarkkinoille liitettävien resurssien sähkösuunnittelusta.

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli kiinteistö- ja rakennusalan asiantuntijayhtiö Granlund Oy. Granlundilla on töissä yli 1500 ammattilaista 30 toimipisteessä ympäri Suomen. Granlund tarjoaa laajasti eri suunnittelu- ja konsultointipalveluita kiinteistösektorille. Esimerkiksi talotekniikkasuunnittelu, arkkitehti- ja rakennesuunnittelu, energiatehokkuuden asiantuntijapalvelut, vastuullisuuspalvelut ja kiinteistöjohtamisen palvelut ovat Granlundin ydinosaamista. Granlund panostaa rakennus- ja kiinteistöalan tuottavuuden parantamiseen, digitalisaation edistämiseen, uusiin energiaratkaisuihin ja vastuullisuuteen. Granlundin tavoitteena on edistää ihmisten hyvinvointia rakennetussa ympäristössä. (Granlund 2025a; Granlund 2025c.)

Granlundilla on perehdytty kiinteistöjen mahdollisuuksiin hyötyä kulutusjoustosta, johon Fingridin reservimarkkinatkin sisältyvät. Granlund voi auttaa asiakkaitaan selvittämään mahdollisuuksia kulutusjouktoon osallistumiseksi. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on lisätä osaamista ja tietoa reservimarkkinoista. (Granlund 2025b.)

2 SÄHKÖMARKKINAT SUOMESSA

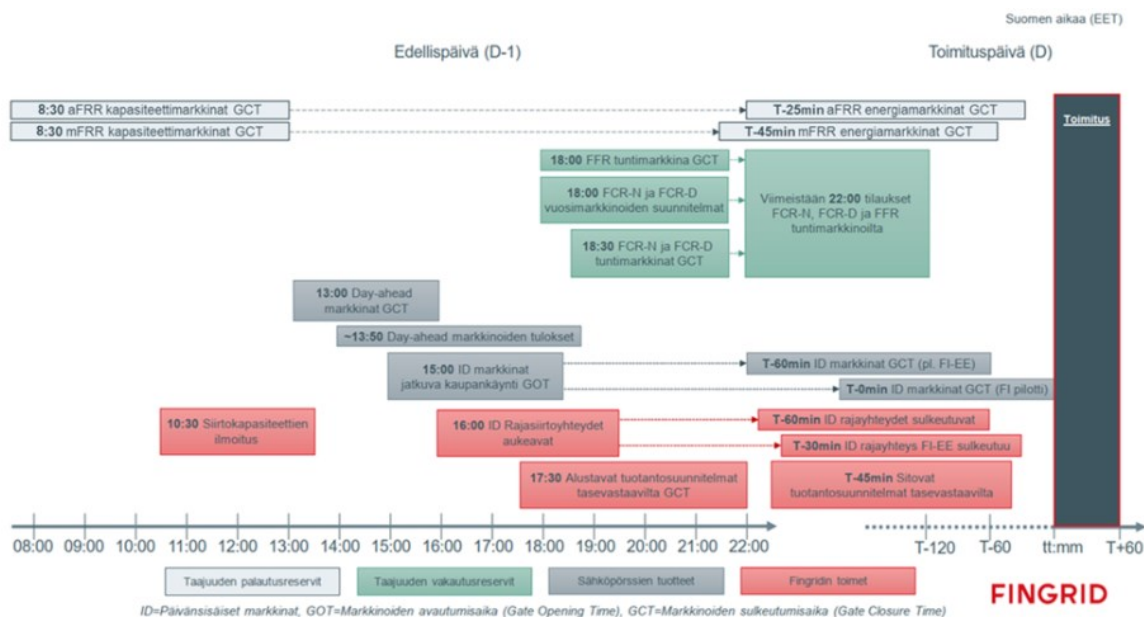
Sähkömarkkinoilla tarkoitetaan järjestelmää, jossa sähköä tuotetaan, myydään ja ostetaan. Se kattaa kaikki vaiheet, jotka liittyvät sähkön tuottamiseen jakeluun ja kulutukseen. Sähkömarkkinoilla toimivat sähköntuottajat, sähkön myyjät sekä sähköverkot. Markkinoiden tarkoitus on varmistaa yhteiskunnan sähkönsaanti mahdollisimman kustannustehokkaasti ja tasapainottavaa sähkön kysyntää ja tarjontaa markkinapaikoilla muodostuvien hintojen perusteella. (Fingrid 2025f.)

Tärkeimpänä sähkömarkkinapaikkana voidaan pitää yhteiseurooppalaisia vuorokausimarkkinoita. Vuorokausimarkkinoista käytetään myös nimitystä day-ahead-markkinat tai tukkusähkömarkkinat. Vuorokausimarkkinat tarjoavat sähköä kaikkien tarpeisiin mahdollisimman kustannustehokkaasti kaikille markkinoille osallistuville alueille. Jokaisessa maassa on omat sisäiset sähkön vähittäismarkkinat vuorokausimarkkinoiden lisäksi. Vähittäismarkkinoilla sähkön myyjät myyvät sähköä pienkuluttajille, jonka ne ovat ostaneet vuorokausimarkkinoilta tai tuottaneet itse. (Fingrid 2025f.)

Vuorokausi- ja vähittäismarkkinoiden lisäksi sähkön tukkumarkkinoihin kuuluvat päivänsisäiset-, reservi- ja johdannaismarkkinat. Päivänsisäisen markkinan kaupankäynti alkaa vuorokausimarkkinoiden jälkeen. Suomessa suuret sähköntuottajat, -kuluttajat ja -jälleenmyyjät voivat tasata sähkötasetaan päivänsisäisen markkinan avulla tuotanto- ja kulutusennusteiden tarkentuessa käyttötunnin alkuun asti. Sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet aikajanalla on esitetty kuvassa 1. (Fingrid 2025f.)

Käyttötunnin aikaisten poikkeamien hallintaan tarvittavia reservejä hankitaan reservimarkkinoilta. Reservien avulla pyritään pitämään sähköverkon taajuus 50 Hz:ssä sallitun vaihteluvälin ollessa 49,9–50,1 Hz. Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita Suomessa ja vastaa reservien hankinnasta, mutta ei itse tuota reservejä. Reservit hankitaan markkinaehtoisesti yrityksiltä, joilla on säätökykyistä kapasiteettia tarjolla. Sähköjärjestelmän tasapainottamisen eri tarpeisiin on erityyppisiä reservituotteita, jotka toimivat kokonaisuutena sähköverkon tasapainottamiseksi. (Fingrid 2025d.)

Johdannaismarkkinoilla sähköstä voidaan käydä kauppaa jopa vuosia eteenpäin. Vähittäismarkkinoilla kuluttajille tarjottavat kiinteähintaiset sähkösopimukset perustuvat pitkälti johdannaissopimuksiin. Johdannaissopimuksilla sähkön myyjät voivat varmistaa sähkön keskimääräisen hinnan sopimuskaudelle. (Fingrid 2025f.)



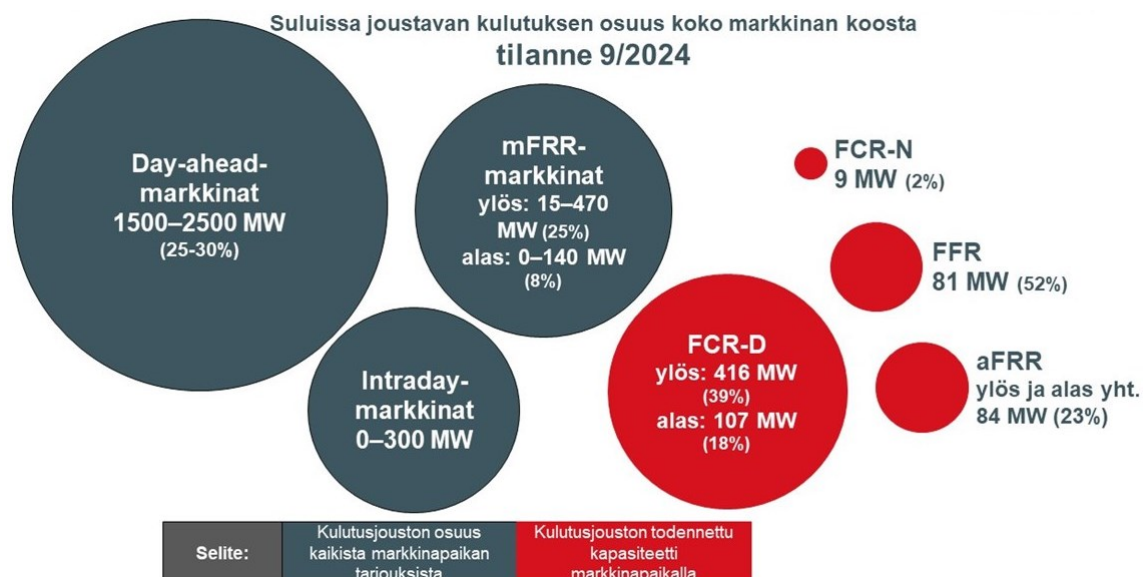
Kuva 1. Sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet fyysisten tuotteiden osalta. (Fingrid 2025b).

Kuvassa 1 on esitetty sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet toimituspäivänä ja sitä edeltävänä päivänä. Ajat ovat esitetty Suomen ajassa. Markkinatoimet fyysisten tuotteiden osalta alkaa edellisenä päivänä klo 8:30. (Fingrid 2025b.)

2.1 Kulutusjousto

Kulutusjousto on tärkeä elementti sähköverkon tasapainon ylläpitämisessä. Kulutusjousto tarkoittaa sähkönkäytön muuttamista hinnan ohjaamana. Kuluttaja voi saada rahallista hyötyä siirtämällä kulutustaan korkean hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan. Korkean hinnan aikaan myös kulutus on korkeampaa suhteessa tuotantoon, joten kulutuksen ohjaaminen hinnan perusteella tasapainottaa sähköverkkoa. Sähkön kuluttaja voi myös myydä joustoaan Fingridin ylläpitämille reservimarkkinoille taloudellisen hyödyn saavuttamiseksi. Reservimarkkinoilla on kuitenkin täytettävä vähimmäisvaatimukset kohteen teholle ja aktiivintikyvyille. (Fingrid 2024d.)

Kun joustamattomien ja sääriippuvaisten sähköntuotantomuotojen osuus lisääntyy Suomessa, myös kulutusjouston tarve kasvaa. Sääriippuvaista tuotantoa on tuuli- ja aurinkovoima ja joustamatonta tuotantoa esimerkiksi ydinvoima. Kulutusjouston avulla voidaan käytännössä vähentää kasvihuonepäästöjä, sillä se ohjaa käyttämään sähköä silloin kun se on halpaa esimerkiksi runsastuulisina aikoina. (Fingrid 2024d; PKS 2024.)



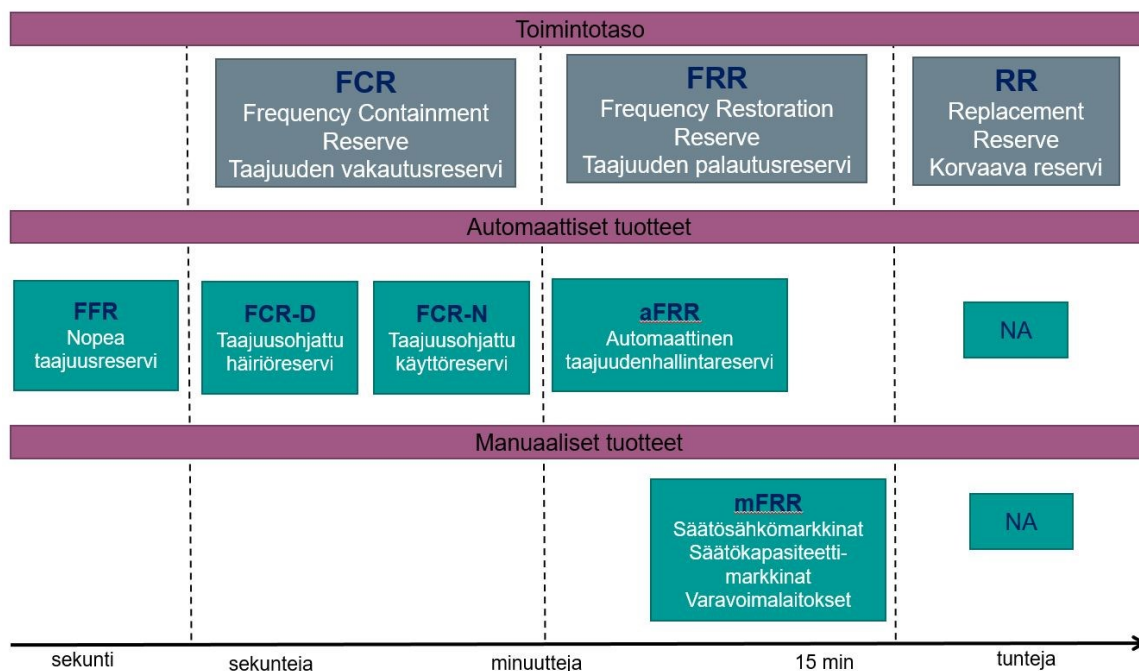
Kuva 2. Kulutusjoustopöytäkirjan osallistuminen eri markkinapaikoille Suomessa (Fingrid 2024d).

Kuvassa 2 on jaoteltu kulutusjoustopöytäkirjan osallistuminen eri markkinapaikoille. Kulutusjoustopöytäkirjan suurimmat kapasiteetit ovat käytössä vuorokausi markkinoilla (day-ahead). Myös päivän sisäisillä (intraday) sekä mFRR ja FCR-D reservimarkkinoilla on merkittävät kapasiteetit käytössä. Pienimmät osuudet kulutusjoustopöytäkirjasta on aFRR, FFR ja FCR-N reservimarkkinoilla. (Fingrid 2024d.)

2.2 Reservi- ja säätösähkömarkkinat

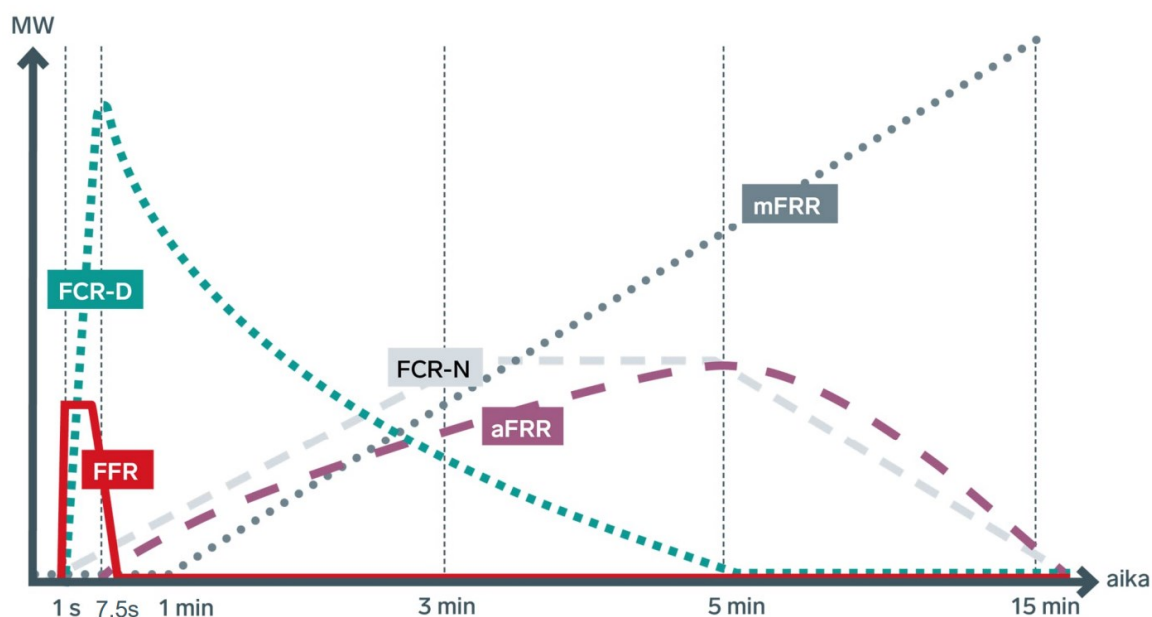
Pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä (Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska) on sovittu reservien ylläpitovelvoitteet järjestelmävastaavien välisellä käyttösopimuksella. Kunkin maan kantaverkoyhtiö vastaa oman reserviosuutensa hankinnasta parhaaksi katsomallaan tavalla. Reserveistä voidaan käydä kauppaa myös maiden välillä, mutta riittävä määrä reservejä on ylläpidettävä kansallisesti. Enintään yksi kolmasosa taajuusohjattujen reservien velvoitteesta voidaan hankkia muista pohjoismaista. Riittävällä kansallisella reservien ylläpidolla varmistetaan taajuuden ylläpito myös saarekekäyttötilanteissa. (Fingrid 2025d.)

Reservituotteita on eri käyttötarkoituksiin erilaisia ja ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään: taajuuden vakautusreservit, taajuuden palautusreservit ja korvaavat reservit. Taajuuden vakautusreservejä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Taajuuden palautusreservien tarkoituksena on palauttaa taajuus normaalialueelle (49,9–50,1 Hz). Taajuuden palautusreservi vapauttaa aktivoituneen taajuuden vakautusreservin takaisin käyttöön. Korvaavat reservit eivät ole käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. Korvaavilla reserveillä varauduttaisiin potentiaalisii häiriötilanteiden jälkeisiin uusiin vikatilanteisiin palauttamalla aiemmin aktivoituneet reservit takaisin valmiuteen. Kolmen edellä mainitun reservituoteriikän lisäksi Pohjoismaissa on käytössä nopea taajuusreservi, joka on otettu käyttöön vuodesta 2020. Nopea taajuusreservi osallistuu taajuuden hallintaan pienen inertian tilanteissa taajuuden vakautusreservien ohella. (Fingrid 2025d.)



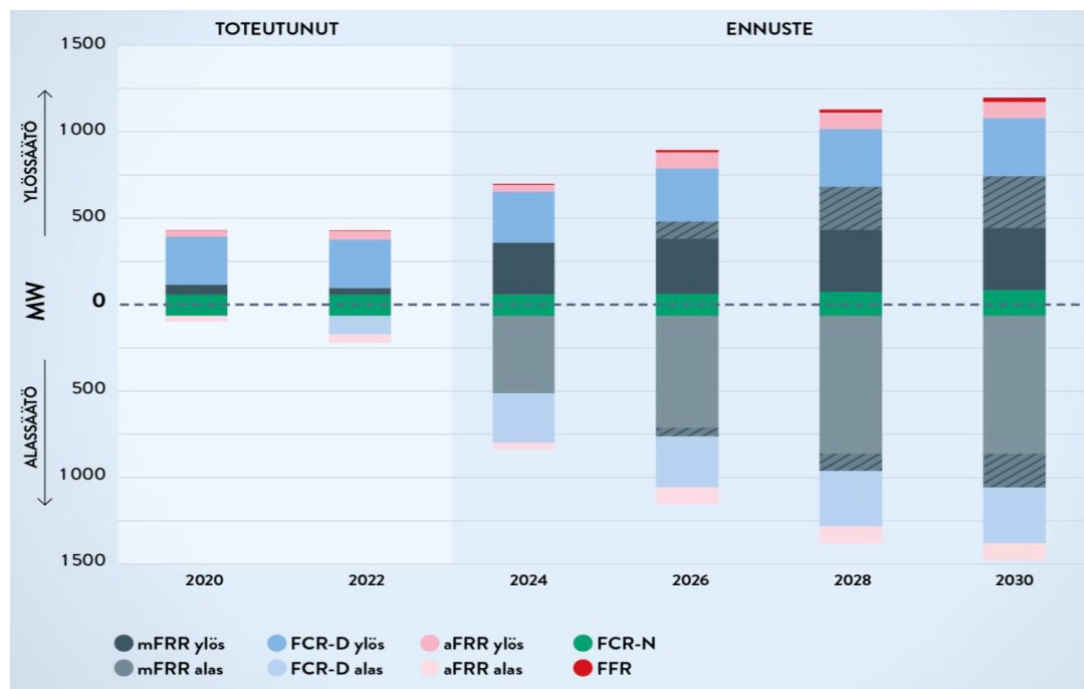
Kuva 3. Reservituotteet jaoteltuna ryhmiin käyttötarkoituksen mukaan (Fingrid 2025d).

Kuvassa 3 on esitetty Suomessa käytettävät reservituotteet. Reservituoteryhmiin jaottelun lisäksi, kuvassa on esitetty eri reservien toiminta-ajat. Vasemmassa reunassa on nopeimmin reagoivat reservituotteet ja oikeassa reunassa hitaimmin reagoivat tuotteet. Kuvassa 4 on esitetty reservituotteiden aktivoitumisaikoja taajuuspoikkeaman sattuessa. Kaikkein nopeimmin reagoi FFR reservit ja hitaimmin mFRR reservit. Nopeammin reagoivat reservituotteet palautuvat valmiuteen seuraavien taajuuspoikkeamien varalle, kun hitaammin reagoivat reservit aktivoituvat. (Fingrid 2024f, 7; Fingrid 2025d.)



Kuva 4. Reservituotteiden toiminta ajan funktiona (Fingrid 2024f, 7).

Reservien tarve sähköjärjestelmässä kasvaa energiamurroksen takia. Säätövoimien tuuli- ja aurinkovoiman kasvu edellyttää aiempaa suurempiin säätötarpeisiin varautumista. Lisäksi säätävää kapasiteettia on poistunut ja tulevaisuudessa poistuu vielä lisää markkinoilta, mikä kasvattaa uuden säätökykyisen kapasiteetin tarvetta. Reservikapasiteetin arvioidaan kasvavan 134 % seuraavien viiden vuoden aikana. (Kuivaniemi 2024, 10–11.) Reserveiksi kelpaa hyvin monipuolisesti eri kulutus- ja tuotantovaihtoehdot, mutta tällä hetkellä reserveihin toivotaan ensisijaisesti lisää tuulivoimaa, kulutusta, akkuja ja aurinkovoimaa (Cygnel 2024, 12–17).



Kuva 5. Reservikapasiteetin hankintamäärät 2020–2030 (Mattila 2024, 19).

Kuvassa 5 on esitetty tarkemmin toteutuneita hankintamääriä eri reservituotteista sekä ennusteita vuoteen 2030 asti. Tulevina vuosina on odotettavissa suurempaa tarvetta eri reservituotteille, etenkin mFRR alas reservikapasiteetin tarve on voimakkaassa kasvussa. (Mattila 2024, 19.)

2.2.1 Nopea taajuusreservi (FFR)

Nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve, FFR) osallistuu taajuuden hallintaan pienen inertian tilanteissa. Inertia tarkoittaa yleisesti fysiikassa muutoksen vastustamista ja hitautta. Sähköverkon inertia on sähköverkossa olevaa liike-energiaa. Liike-energia on varastoitunut voimalaitoksissa ja tehtaissa oleviin pyöriviin koneisiin, jotka pyörivät samalla taajuudella sähköverkon kanssa. Pyörivä massa tuottaa inertiaa sähköverkkoon. (Leinonen 2018, 15.)

Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä noudatettavan käytännön mukaan, yksittäisen sähkön tuotantoyksikön tai HVDC-siirtoyhteyden (suurjännitetasavirta) menetyksen seurauksena taajuus ei saa pudota alle 49,0 Hz:n tason. Häiriön aiheuttaman hetkellisen taajuusmuutoksen suuruus riippuu tehomuutoksen suuruudesta ja sähköjärjestelmän sen hetkisestä inerttiasta ja reservien aktivoitumisnopeudesta. Tätä käytäntöä tukemaan käytetään nopeaa taajuusreserviä. Tarvittava määrä nopeaa taajuusreserviä määritetään sähköjärjestelmän kunkin hetken inertian määrän ja mitoittavan vian suuruuden mukaan. (Fingrid 2024e.) Fingridin hankintavelvoite vuodelle 2025 FFR reserville on n.

0–60 MW (Fingrid 2025d). FFR reserviä hankitaan vain osalle tunneista ja hankittava määrä vaihtelee, hankintatarpeen painottuessa kevät-, kesä- ja syyskuukausina hetkiin, jolloin inertian määrä on pienimmillään (Fingrid 2024e).

Nopea taajuusreservi on otettu käyttöön vuonna 2020 Pohjoismaissa. Reservitoimittaja voi osallistua reservimarkkinoille tehtyään FFR-markkinasopimuksen. Ennen markkinasopimuksen tekemistä, reservitoimittajan on suoritettava säätökokeet hyväksytysti todentaakseen reservikohteen säätöominaisuudet soveltuviksi. (Fingrid 2024e.) Reservikaupankäynti FFR markkinoilla tapahtuu tarjouskilpailulla seuraavan vuorokauden tunneille. Tarjoukset jätetään päivittäin klo 18:00 mennessä ja tulokset läpi menneistä tarjouksista selviävät klo 22:00 mennessä. Yhden tarjouksen vähimmäiskapasiteetti nopeaksi taajuusreserviksi on yksi megawatti ja enimmäiskapasiteetti kymmenen megawattia. Tarjoukset annetaan 0,1 MW:n tarkkuudella ja sama reservitoimittaja voi jättää useita tarjouksia. (Fingrid 2024b, 6–7.)

Nopean taajuusreservin aktivointi

Nopea taajuusreservi toimii ylössäätönä joko syöttämällä lisää tehoa sähköverkkoon tai pienentämällä tehon kulutusta. FFR reservillä on kolme vaihtoehtoa aktivointitaajuudelle ja sitä vastaavalle aktivointiajalle, joista reservitoimittaja voi valita yhden. Kun taajuus saavuttaa valitun kynnyksarvon, tulee reservikapasiteetin aktivoitua täysin valitun aktivointiajan sisällä. Vaihtoehtoiset aktivointitaajuudet ja -ajat on esitetty taulukossa 1. (Fingrid 2023a, 5.)

Taulukko 1. Nopean taajuusreservin aktivointitaajuus ja -aika (Fingrid 2023a, 5).

| Aktivointitaajuus (Hz) | Aktivointiaika (s) |
|------------------------|--------------------|
| $\leq 49,70$ | $\leq 1,30$ |
| $\leq 49,60$ | $\leq 1,00$ |
| $\leq 49,50$ | $\leq 0,70$ |

Taulukossa esimerkiksi vaihtoehto $\leq 49,70$ Hz ja $\leq 1,30$ s tarkoittaa, että mikäli taajuus on 49,70 Hz tai alle, tulee reservin olla aktivoitunut maksimissaan 1,30 sekunnissa. Reservi voi aktivoitua ramppimaisesti tai askelmaisesti. (Fingrid 2023a, 5.)

Säädössä käytetyn taajuuden voi mitata reservikohteen tarjoajan valitsemasta pisteestä Suomen sähköjärjestelmässä (pois lukien Ahvenanmaan itsehallintoalue). Taajuusmittauksen näytteenottoväli tulee olla enintään 0,1 sekuntia ja tarkkuus vähintään 10 mHz. (Fingrid 2023a, 7.)

FFR reservin aktivoinnin vähimmäiskestolle on kaksi vaihtoehtoa. Vaadittu vähimmäiskesto riippuu reservikohteen deaktivoinnin nopeudesta. Kohteen tulee pysyä aktivoituneena vaaditun vähimmäiskeston ajan taajuuden arvosta riippumatta. Reservikohteen deaktivointi on sallittua taajuudesta riippumatta, kun vaaditun vähimmäiskeston mukainen aika on kulunut. Deaktivoinnilla tarkoitetaan kohteen palauttamista tilaan, jossa reservikapasiteetti ei ole enää aktivoituneena. (Fingrid 2023a, 5.)

Taulukko 2. Nopean taajuusreservin aktivoinnin vähimmäiskesto (Fingrid 2023a, 5).

| Aktivoinnin vähimmäiskesto (s) | Deaktivoinnin maksiminopu |
|--------------------------------|--|
| 30 s | ei rajoitettu |
| 5 s | enintään 20 % reservikapasiteetista sekunnissa |

Mikäli FFR reservin deaktivoinnin nopeus on rajoittamaton, aktivoinnin vähimmäiskesto on 30 sekuntia. Jos deaktivoinnin maksiminopeus on enintään 20 % reservikapasiteetista sekunnissa, aktivoinnin vähimmäiskesto on viisi sekuntia. (Fingrid 2023a, 5.)

Nopean taajuusreservin palautuminen ja valmius uuteen aktivointiin

Reservikohteen palautumiselle aktivoinnin jälkeen on asetettu tiettyjä ehtoja. Palautumisella tarkoitetaan tehon ottamista sähköverkosta. Palautumisteho saa olla enintään 25 % reservikohteen nopean taajuusreservin kapasiteetista. Tehoa voidaan tarvita esimerkiksi energiavaraston varaustason nostamista tai suuntaajakytketyn generaattorin nimellisen pyörimisnopeuden palauttamista varten. (Fingrid 2023a, 6.)

Jos reservikohteen aktivoinnin vähimmäiskesto on 30 sekuntia, voi palautumisen aloittaa heti aktivoinnin vähimmäiskeston päätyttyä. Reservikohteen, jonka aktivoinnin vähimmäiskesto on viisi sekuntia, tulee odottaa 15 sekuntia aktivoinnin vähimmäiskeston päättymisestä, ennen palautumisen aloittamista. Reservikohteen aktivointisyklin pituus saa olla enintään 15 minuuttia. Tämä tarkoittaa, että reservikohteen on kyettävä uuteen aktivointiin 15 minuutin kuluttua edellisestä aktivoinnista. (Fingrid 2023a, 6.)

2.2.2 Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi ovat pätötehoreservejä, jotka aktioituvat automaattisesti taajuudenmuutosten mukaan. Taajuusohjattuja käyttö- ja häiriöreservejä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal operation, FCR-N) pyrkii pitämään taajuuden normaalitaajuusalueella 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjatun käyttöreservin on kyettävä symmetrisesti sekä ylös- että alassäätöön. Ylösäättö tarkoittaa sähkön tuotannon lisäystä tai sähkönkulutuksen vähentämistä. Alassäätö tarkoittaa vastaavasti sähkön tuotannon vähentämistä tai kulutuksen lisäystä. (Fingrid 2024h.)

Fingrid hankkii Suomessa tarvittavat määrät taajuusohjattuja käyttö- ja häiriöreservejä kotimaisilta vuosi- ja tuntimarkkinoilta, Viron tasasähköyhteyksiltä sekä muista Pohjoismaista. Muista pohjoismaista voidaan hankkia kuitenkin enintään 1/3 taajuusohjattujen reservien veloitteesta. Fingridin hankintavelvoite FCR-N reserville on 126 MW vuonna 2025. (Fingrid 2025d.) Suomessa reservitoimittaja voi tarjota reservikapasiteettiaan vuosi- ja/tai tuntimarkkinoille. Vuosi- ja tuntimarkkinoiden eroavaisuudet on kuvattu taulukossa 3. Yksittäisen FCR-N tarjouksen vähimmäiskoko on 0,1 MW. (Fingrid 2024h.)

Vuosi- ja tuntimarkkinoilla kaupankäynnin kohteena on erikseen FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas reservit, joista molemmilla markkinoilla on samat tekniset vaatimukset. Fingridin solmimat sopimukset vuosi- ja tuntimarkkinoilla ovat ehdoiltaan, sisällöltään ja korvauksiltaan samanlaiset kaikkien osapuolten kanssa. (Fingrid 2024h.)

Taulukko 3. Vuosi- ja tuntimarkkinoiden periaatteelliset erot (Fingrid 2024h).

| Vuosimarkkinat | Tuntimarkkinat |
|--|---|
| Tarjouskilpailu järjestetään kerran vuodessa (syksyllä). | Reservitoimittaja voi osallistua tuntimarkkinoille tekemällä siitä erillisen sopimuksen Fingridin kanssa, eikä se edellytä vuosisopimuksen tekemistä. |
| Kesken sopimuskauden ei ole mahdollista tulla mukaan reservin ylläpitoon vuosisopimuksella. | Tuntimarkkinoille mukaantulo on mahdollista myös kesken vuoden. |
| Reservisuunnitelmien mukainen määrä ostetaan täysmääräisesti. | Tarvittava määrä tarjouksia käytetään hintajärjestyksessä periaatteella halvin ensin. |
| Reservisuunnitelmat jätettävä edellisenä päivänä <u>klo 18:00 mennessä</u> . | Tarjoukset seuraavan vuorokauden tunneille jätettävä <u>klo 18:30 mennessä</u> . |
| Reservitoimittajalla on velvollisuus ylläpitää vuosimarkkinoille myymäänsä reserviä vapaan kapasiteettinsa puitteissa. | Reservitoimittajat voivat päivittäin antaa tarjouksia reservikapasiteetistaan. Reservitoimittaja, jolla on vuosisopimus, voi osallistua tuntimarkkinoille vain, jos on toimittanut vuosisopimuksen mukaisen reservimäärän täysimääräisesti. |
| Kiinteä hinta on voimassa koko vuoden. Se määräytyy kalleimman vuosimarkkinalle hyväksytyn tarjouksen mukaan. | Maksettava korvaus määräytyy kullekin tunnille erikseen kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan. |

FCR-N reservin aktivointi

FCR-N reservi pyrkii pitämään taajuuden normaalitaajuusalueella 49,9–50,1 Hz. FCR-N reservit aktivoivat alassäädön, kun taajuus nousee yli 50 hertsin. Reservin aktivointi saavuttaa huippunsa taajuuden noustessa 50,1 Hz:iin. Ylössäätö aktivoituu FCR-N reservillä, kun taajuus laskee alle 50 hertsin ja saavuttaa huippunsa 49,9 Hz:n kohdalla. (Fingrid 2023c, 11.)

Taulukko 4. FCR-N reservin aktivointitaajuudet (Fingrid 2023c, 11).

| Reservituote | 100 % negatiivinen aktivointi | 0 % aktivointi | 100 % positiivinen aktivointi |
|--------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| FCR-N | $f \geq 50,1$ Hz | $f = 50$ Hz | $f \leq 49,9$ Hz |

FCR-N reservin on aktivoiduttava dynaamisesti taajuusmuutoksen mukaan. Kun taajuus muuttuu askelmaisesti 50,0 Hz:stä 49,9 Hz:iin tai 50,1 Hz:iin, FCR-N reservin on aktivoitava n. 63 % tehostaan minuutissa ja n. 95 % kolmessa minuutissa. (Fingrid 2023c, 13–15.)

Rajalliset energiavarastot

Reservikohteet, joiden energiavarasto on pienempi kuin kahden tunnin aktivointia vastaava energia, luokitellaan rajallisiksi energiavarastoiksi (LER, limited energy reservoir). Taulukossa 5 on esitetty LER reservikohteilta vaadittavat vähimmäistehot ja -energiat. Esimerkiksi 1 MW:n FCR-N reservi vaatii vähintään 1,34 MW tehoa ja 2 MWh energiaa. (Fingrid 2023c, 37–38.)

Taulukko 5. Teho- ja energiavaatimukset FCR-N reserveille (Fingrid 2023c, 38).

| | FCR-N |
|--|----------------------------|
| Vaadittu teho ylös [MW] | +1,34 x C _{FCR-N} |
| Vaadittu teho alas [MW] | -1,34 x C _{FCR-N} |
| Vaadittu energia ylös [MW] | 1 h x C _{FCR-N} |
| Vaadittu energia alas [MW] | 1 h x C _{FCR-N} |
| C _{FCR-N} on FCR-N kapasiteetti | |

2.2.3 Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)

Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances, FCR-D) on taajuusohjatun käyttöreservin tapaan automaattisesti aktivoituva pätötehoreservituote. Taajuuden poikkeuksessa normaalitaajuusalueelta, taajuusohjattu häiriöreservi pyrkii pitämään taajuuden vähintään 49,5 ja enintään 50,5 Hz:ssä. Toisin kuin FCR-N reservi, FCR-D reservi on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin (FCR-D ylös ja FCR-D alas). Yksittäisen FCR-D tarjouksen vähimmäiskoko on yksi megawatti. (Fingrid 2024h.)

Fingridin hankintavelvoite FCR-D ylös reserville on 304 MW ja FCR-D alas reserville 293 MW vuonna 2025 (FCR-D alas reservin hankintamäärää nostetaan vaiheittain). Taajuusohjatun häiriöreservin tarve määräytyy Pohjoismaissa suurimman yksittäisen vian perusteella. Yksittäisen vian aiheuttama pysyvä taajuuspoikkeama saa olla enintään 0,5 Hz. Reservin tarve mitoitetaan erikseen ali- ja ylitaajuushäiriöitä varten. Suuren sähköntuotantolaitoksen tai sähköä tuovan siirtoyhteyden irtoaminen verkosta voi aiheuttaa alitaajuushäiriön ja ylitaajuushäiriö voi johtua suuren kulutuskohteen tai sähköä vievän siirtoyhteyden irtoamisesta sähköverkosta. (Fingrid 2025d.)

FCR-D reservin aktivointi

FCR-D ylös reservi toimii ylösäätönä joko syöttämällä lisää tehoa sähköverkkoon tai pienentämällä tehon kulutusta. FCR-D alas reservi toimii vastaavasti alassäätönä lisäämällä tehon kulutusta tai syöttämällä vähemmän tehoa sähköverkkoon. FCR-D ylös reservi aktivoituu, kun taajuus laskee alle 49,9 Hz:n ja on aktivoitunut täysin taajuuden arvossa 49,5 Hz. Vastaavasti FCR-D alas reservi aktivoituu taajuuden noustessa yli 50,1 Hz:n ja on täysin aktivoitunut taajuuden saavuttaessa 50,5 Hz. (Fingrid 2023c, 11.)

Taulukko 6. FCR-D reservien aktivointitaajuudet (Fingrid 2023c, 11).

| Reservituote | 100 % negatiivinen aktivointi | 0 % aktivointi | 100 % positiivinen aktivointi |
|--------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| FCR-D ylös | N.A. | $f \geq 49,9$ Hz | $f \leq 49,5$ Hz |
| FCR-D alas | $f \geq 50,5$ Hz | $f \leq 50,1$ Hz | N.A. |

Kun taajuus laskee nopeasti alle 49,5 Hz:iin FCR-D ylös reservien on aktivoitava 86 % tehostaan 7,5 sekunnin kuluessa taajuusmuutoksesta. Vastaavasti kun taajuus nousee nopeasti 50,5 Hz:iin, on FCR-D alas reservien aktivoitava 86 % tehostaan 7,5 sekunnin kuluessa taajuusmuutoksesta. Aktivoitu energia 7,5 sekunnin kuluttua taajuusmuutoksesta tulee olla 3,2 kertaa reservikapasiteetti. Aktivoituneelle energialle asetettu vaatimus edellyttää, että tehoa aktivoituu huomattavasti jo taajuuspoikkeama alussa. (Fingrid 2023c, 15–20.)

Rajalliset energiavarastot

Samoin kuin FCR-N reservikohteilla, myös FCR-D reserveillä on käytössä rajalliset energiavarastot. Energiavarastot, jotka ovat pienempiä kuin kahden tunnin aktivointia vastaava energia, luokitellaan rajallisiksi energiavarastoiksi. Taulukossa 7 on esitetty LER reservikohteilta vaadittavat vähimmäistehot ja -energiat FCR-D reservien osalta. Esimerkiksi 1 MW:n reservi sekä ylös- että alassäätöön vaatii vähintään 1,2 MW tehoa ja 0,67 MWh energiaa. (Fingrid 2023c, 37–38.)

Taulukko 7. Teho- ja energiavaatimukset FCR-D reserveille (Fingrid 2023c, 38).

| | FCR-D ylös | FCR-D alas |
|----------------------------|--|---|
| Vaadittu teho ylös [MW] | $+C_{\text{FCR-D ylös}}$ | $+0,20 \times C_{\text{FCR-D alas}}$ |
| Vaadittu teho alas [MW] | $-0,20 \times C_{\text{FCR-D ylös}}$ | $-C_{\text{FCR-D alas}}$ |
| Vaadittu energia ylös [MW] | $1/3 \text{ h} \times C_{\text{FCR-D ylös}}$ | 0 |
| Vaadittu energia alas [MW] | 0 | $-1/3 \text{ h} \times C_{\text{FCR-D alas}}$ |

$C_{\text{FCR-D}}$ on FCR-D kapasiteetti

2.2.4 Taajuusohjattujen reservien markkinapaikat

Taajuusohjatuille reserveille on Suomessa kaksi markkinapaikkaa: vuosi- ja tuntimarkkinat. Vuosimarkkinoilla reservien tarjouskilpailu järjestetään syksyllä seuraavaksi vuodeksi. Tarjouskilpailussa määritetään reservitoimijakohtainen vuosisopimusmäärä ja vuosimarkkinahinta. Vuosimarkkinahinta määräytyy kalleimman hyväksytyyn tarjouksen mukaisesti ja se on kaikille sama. Vuosimarkkinoille osallistuva reservitoimittaja jättää seuraavaa päivää koskevat sitovat tuntikohtaiset reservisuunnitelmat (MW) ylläpitämästään reservistä klo 18:00 mennessä. (Fingrid 2023b, 12.)

Tuntimarkkinoille osallistuminen on mahdollista mihin aikaan vuodesta tahansa. Reservitoimittaja jättää tuntikohtaiset reservitarjoukset seuraavalle päivälle klo 18:30 mennessä. Tarjouksessa ilmoitetaan tarjottavan tehon määrä (MW) ja hinta (€/MW). Hinta määräytyy jokaiselle tunnille kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan. Fingrid määrittää tarvitsemansa reservikapasiteetin jokaiselle tunnille, eikä jokaiselle tunnille välttämättä tule ostoja. Reservitoimittajan on valittava vuosimarkkinan ja tuntimarkkinan väliltä, eikä samaa kapasiteettia voi tarjota molemmille markkinoille samaan aikaan. (Fingrid 2023b, 12.)

2.2.5 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)

Automaattinen taajuuden palautusreservi (automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR) on otettu käyttöön Pohjoismaissa vuonna 2013. Automaattisen taajuuden palautusreservin tarkoituksena on sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen. Automaattinen taajuuden palautusreservi on automaattisesti aktivoituva, keskitetty reservi. Aktivointi tapahtuu kantaverkkoyhtiön lähettämän tehonmuutossignaalin avulla. (Fingrid 2024a.)

Fingridin velvoite vuodelle 2025 aFRR reservin hankintaan on 46–62 MW, mutta vain osalle vuorokauden tunneista (Fingrid 2025d). Säädön vähimmäiskoko on yksi megawatti ja aktivoitumisaika enintään viisi minuuttia. Automaattisen taajuuden palautusreservin hankinta tapahtuu pohjoismaisilta kapasiteettimarkkinoilta. Reserviä hankitaan vain etukäteen ilmoitetuille tunneille. Hankintatunnit on valittu tyyppillisen suurimman taajuuden vaihtelun mukaan. (Fingrid 2024a.)

Automaattisesta taajuuden palautusreservistä jätetään tarjoukset tuntimarkkinoille. Tarjouksia voi antaa erikseen ylös- ja alassäätökykyisestä kapasiteetista. Reservitoimittaja saa korvauksen ylläpidetystä kapasiteetista kalleimman hyväksytyin tarjouksen mukaan. Hinnoittelu tapahtuu siis samalla tavalla kuin muillakin reservimarkkinoilla. Reservin aktivoitumisesta aiheutunut energiakulu korvataan reservitoimittajalle markkina-aikajakson marginaalihinnalla. (Fingrid 2024a.)

aFRR reservin aktivointi

Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivointi perustuu pohjoismaisen sähköjärjestelmän taajuuspoikkeamaan. Taajuuspoikkeaman perusteella lasketaan tarvittava tehonmuutos taajuuden palauttamiseksi nimellisarvoonsa. Lisäksi aFRR reservin tehtävä on vapauttaa jo aktivoituneet taajuusohjatut reservit. Fingrid lähettää ELCOM tai ICCP tiedonvaihtoa käyttäen aktivointisignaalia reservinhaltijoille 10 sekunnin välein. Jos aktivointipyynnö on alassäätöä, aktivointisignaalin etumerkki on negatiivinen. Aktivointipyynnön ollessa ylösäätöä, aktivointisignaalin etumerkki on positiivinen. (Fingrid 2022, 4.)

Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivointinopeus tulee olla viisi minuuttia aktivointisignaalin lähetyksestä. Reservikohteen tulee aloittaa aktivointi viimeistään 30 sekunnin kuluessa aktivointisignaalin lähetyksestä ja olla täysin aktivoitunut viidessä minuutissa. Aktivoituvan reservin määrän on oltava 90–110 % tehopyynnöstä. (Fingrid 2022, 4–5.)

2.2.6 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

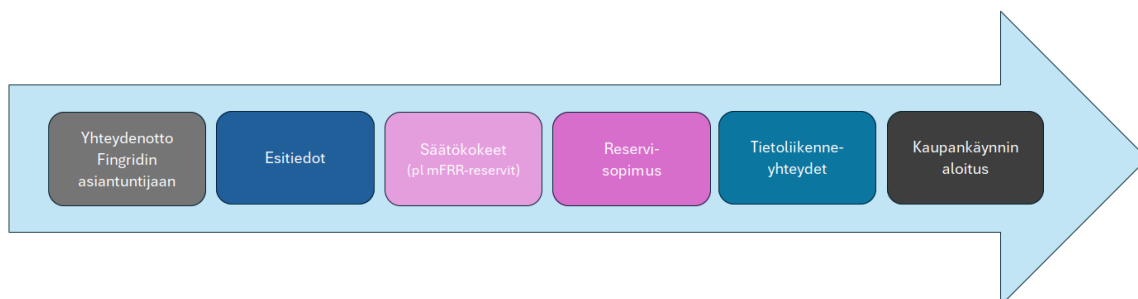
Fingrid ylläpitää yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa pohjoismaisia säätösähkömarkkinoita. Fingrid hankkii säätökapasiteettimarkkinoilta (manual Frequency Restoration Reserve, mFRR) tarvittavan määrän säätökapasiteettia. Säätökapasiteettia tarvitaan kulutuksen ja tuotannon välisen tasapainon ylläpitämiseksi sekä muihin siirtoverkon edellyttämiin tarpeisiin käyttövarmuuden takaamiseksi. Reservitoimittajat voivat antaa tarjouksia säätökykyisestä kapasiteetistaan säätösähkömarkkinoille ja saavat korvauksen hyväksytyistä tarjouksista. (Fingrid 2024g.) Fingridin velvoite vuodelle 2025 manuaalisen taajuuden palautusreservin ylösäätö hankintaan on 880–1300 MW. Velvoite manuaalisen taajuuden palautusreservin alassäätö hankintaan on 575 MW (mFRR alassäätö reservin hankintamäärää nostetaan vaiheittain). (Fingrid 2025c.)

Säätötarjouksia voi antaa sellaisista resursseista, jotka pystyvät minimitarjouskoon mukaiseen tehonmuutokseen 15 minuutissa. Säätötarjouksien minimikoko on viisi megawattia ja tarjoukset annetaan yhden megawatin tarkkuudella. Jos säätötarjous voidaan aktivoida elektronisesti, silloin tarjouksen minimikoko on yksi megawatti. Elektronisen aktivoinnin ollessa mahdollista, reservitoimittaja voi jättää viisi alle viiden megawatin ylös- ja alassäätötarjousta kutakin käyttötuntia kohden. Säätötarjoukset annetaan Fingridin reservikaupankäynti ja tiedonvaihto -ohjeen mukaisesti viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötuntia. Säätötarjouksessa pitää olla seuraavat tiedot säädettävästä kapasiteetista: tarjouksen kohdeaika (h), teho (MW), hinta (€/MW) ja reservikohteen nimi. (Fingrid 2024g.)

Pohjoismaisilla säätösähkömarkkinoilla säätösähkön hinnat määräytyvät toteutuneiden säätöjen perusteella. Jokaiselle käyttötunnille määritetään sekä ylös- että alassäätöhinta. Ylössäätöhinta määräytyy kalleimman tilatun ylössäätötarjouksen mukaan ja alassäätöhinta halvimman käytetyn alassäätötarjouksen hinnan mukaan. Kaikki ylössäätötarjoukset saavat maksun sovitusta energiasta, jotka Fingrid on tilannut tunnin aikana. Vastaavasti kaikki Fingridin tunnin aikana tilaamat alassäätötarjoukset maksavat sovitusta energiasta alassäätöhinnan mukaan. (Fingrid 2024g.)

2.3 Reservimarkkinoille liittyminen

Reservimarkkinoille voi osallistua kuka vain, kunhan asiasta on sovittu tasevastaavan kanssa. Reservitoimittaja voi siis olla säätökykyisen resurssin omistaja, sähkönmyyjä, tasevastaava tai avoimen toimitusketjun ulkopuolinen osapuoli. Oli reservitoimittaja kuka tahansa, säätökykyisen resurssin omistajalta pitää olla lupa säätökäytöstä. Lisäksi tasevastaavaa on informoitava säätökäytöstä kaikissa tapauksissa. (Korhonen 2024, 51.)



Kuva 6. Reservimarkkinoille tulon vaiheet yksinkertaistetusti (Korhonen 2024, 55).

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistetusti reservimarkkinoille tulon vaiheet aikajärjestyksessä. Reservimarkkinoille liittymisen prosessi aloitetaan yhteydenotolla Fingridin asiantuntijaan. Fingridin kanssa käydään läpi suunnitellun resurssin soveltuvuus reservimarkkinoille, sekä markkinapaikan edellytykset. Tarvittavia esitietoja ovat reservikohteen nimi ja tyyppi, arvioitu kapasiteetti reservimarkkinoille ja aikataulu reservimarkkinoille liittymiseen. Lisäksi tarvitaan tieto reservitoimittajasta, tasevastaavasta sekä käytetyistä palveluntarjoajista ja tieto onko kohde aggregoitu. Tietoliikenteen, kaupankäynnin ja markkinavalvonnan yhteystiedot tarvitaan viimeistään ennen käyttöönottoa. (Korhonen 2024, 55–60.)

Esitietojen selvityksen jälkeen reservikohteelle tehdään tarvittavat säätökokeet. Säätökokeilla on tarkoitus todentaa reservikohteen tekninen soveltuvuus reservimarkkinoille. Säätökokeet tehdään FFR, FCR ja aFRR reservituotteille, eli kohteille, jotka toimivat automaattisesti. Säätökokeesta tulee

tehdä suunnitelma, joka hyväksytetään Fingridillä viimeistään kaksi viikkoa ennen säätökoetta. Säätökoetta ei tehdä mFRR reserville. (Korhonen 2024, 61.)

Hyväksytyt säätökokeen jälkeen Fingrid ja reservitoimittaja tekevät tarvittavat sopimukset reservien tarjoamisesta. Sopimukset ja sopimukseen kuuluvat liitteet ovat Fingridin sopimus pohjan mukaiset. Tarvittavat sopimus pohjat löytyvät Fingridin verkkosivuilta. (Korhonen 2024, 56–63.)

Ennen kaupankäynnin aloitusta reservikohteen tietoliikenneyhteyden Fingridin suuntaan tulee olla kunnossa. Reservien ylläpitoon vaaditaan tietoja, jotka toimitetaan reaaliaikaisesti. Toimitettavat tiedot on määritelty tarkemmin Fingridin *Reservien tiedonvaihto – signaalilista* -ohjeessa. (Korhonen 2024, 65.) Reservikohteiden tietoliikenneyhteyksiä ja tiedonsiirtoa käsitellään tarkemmin tämän työn luvussa 3.6.

Kun edellä mainitut vaiheet on suoritettu, Fingrid antaa luvan osallistua reservimarkkinoille. Tässä vaiheessa reservitoimittajaa ohjeistetaan vielä laskutuksesta, ja varmistetaan tarvittaessa kaupankäynnin toimivuus (koskee aFRR reserviä). (Korhonen 2024, 55–68.)

2.4 Reserviresurssien aggregointi

Aggregointi tarkoittaa usean verkon käyttäjän kuormien tai tuotantolaitosten tuottaman sähkön yhdistämistä myytäväksi, ostettavaksi tai huutokaupattavaksi sähkömarkkinoilla. Itsenäisellä aggregaattorilla tarkoitetaan aggregaattoria, joka ei ole sidoksissa asiakkaan avoimeen sähköntoimittajaan. (Laki sähkömarkkinalain muuttamisesta 497/2023, 3§.) Aggregointisopimus on aggregaattorin ja loppukäyttäjän välinen sopimus sähkökäyttöpaikan ja kulutusjouston hyödyntämisestä aggregoimalla (Laki sähkömarkkinalain muuttamisesta 497/2023, 84§).

Itsenäinen aggregointi lisää joustoa sähköjärjestelmässä ja antaa loppukäyttäjille uusia mahdollisuuksia osallistua sähkömarkkinoille. Reservimarkkinoille osallistumisen tulee olla loppukäyttäjille tasapuolista ja syrjimätöntä. Loppukäyttäjä saa tehdä aggregointisopimuksen ilman verkonhaltijan tai sähköntoimittajan erillistä suostumusta. (Fingrid 2024c.)

Tällä hetkellä itsenäinen aggregointi on mahdollista FFR, FCR-D ja FCR-N reserveissä. Itsenäinen aggregaattori voi koota joustoresursseja eri tasevastuiden piiristä. Aggregoidun reserviresurssin minimitarjouskoot, aktivointitaajuudet ja -nopeudet ovat samat, kuin muutenkin kyseisellä reservituotteella. (Fingrid 2024c.)

Kuvassa 7 on itsenäisen aggregoinnin keskeisimmät asiat kullakin reservimarkkinalla (tilanne 9/2024). Automaattisen taajuuden palautusreservin itsenäinen aggregointi ollaan ottamassa käyttöön arviolta maaliskuussa 2025. Manuaalisen taajuuden palautusreservin itsenäinen aggregointi ollaan ottamassa käyttöön arviolta vuoden 2026 aikana. (Fingrid 2024c.)

| FCR-D | FCR-N | FFR | aFRR |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Itsenäinen aggregointi sallittu 1.1.2017 alkaen • Minimitarjouskoko 1 MW • Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle • Ei energiamaksua tai tasepoikkeamakorjausta <ul style="list-style-type: none"> ➢ Aktivoinnin aiheuttama energiavaikutus on vähäinen • Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. | <ul style="list-style-type: none"> • Itsenäinen aggregointi sallittu 1.1.2018 alkaen • Minimitarjouskoko 0,1 MW • Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle • Energiamaksu ja tasepoikkeamakorjaus <ul style="list-style-type: none"> ➢ Säätoenergia korjataan ja korvataan (tasepoikkeaman hinnalla) kokonaisuudessaan reserviresurssin sähkönmyyjän tasevastaavalle • Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. | <ul style="list-style-type: none"> • Itsenäinen aggregointi sallittu 12.5.2020 alkaen • Minimitarjouskoko 1 MW • Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle • Ei energiamaksua tai tasepoikkeamakorjausta <ul style="list-style-type: none"> ➢ Aktivoinnin aiheuttama energiavaikutus on vähäinen • Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. | <ul style="list-style-type: none"> • Arvioitu itsenäisen aggregoinnin käyttöönotto maaliskuuhun 2025 |
| <p>Itsenäinen aggregointi ei ole vielä mahdollista mFRR-tuotteessa. Itsenäisen aggregoinnin käyttöönotto mFRR-tuotteessa on arviolta vuoden 2026 aikana.</p> | | | <p>FINGRID</p> |

Kuva 7. Itsenäinen aggregointi Fingridin reservimarkkinoilla (Fingrid 2024c).

2.5 Reservimarkkinoiden ansaintamallit

Reservimarkkinoilla maksetaan korvauksia varalla olevasta reservikapasiteetista (kapasiteettikorvaus), ja aktivoituneesta säätöenergiasta (energiamaksu). Kapasiteettikorvaus on käytössä kaikilla reservituotteilla ja sitä maksetaan reservikapasiteetin ylläpidosta. Energiamaksu maksetaan aktivoituneesta säätöenergiasta. Energiamaksu on käytössä FCR-N, aFRR ja mFRR reserveillä. (Rinne 2024, 181–195.)

Reservimarkkinoilla reservin toimittajat saavat kapasiteettikorvauksen hyväksytyjen tarjoustensa mukaan. Korvausten hinnoittelu määräytyy kalleimman hyväksytyjen tarjouksen mukaan. Fingrid hyväksyy tarvittavan määrän tarjouksia aloittaen edullisimmasta tarjouksesta. Kaikki reservin toimittajat, joiden tarjous hyväksytään, saavat korvauksen kalleimman hyväksytyjen tarjouksen mukaan. Tarjouksia voi jättää joko vuosi- tai tuntimarkkinoille. (Fingrid 2023b, 12; Fingrid 2024a; Fingrid 2024b, 6–7; Fingrid 2024g; Fingrid 2024h.)

Yksittäisen hyväksytyjen kapasiteettitarjouksen tuotto tunnin aikana reservimarkkinoilla määräytyy tarjotun reservikapasiteetin määrän (MW) ja tarjouskilpailussa määräytyneen hinnan (€/MW) tulona. Vuosituotto määräytyy vuoden aikana hyväksytyjen tarjoustensa mukaisen reservikapasiteetin (MW) ja keskiarvohinnan tulona (€/MW,h). Tuottojen maksimoinniksi hinnoittelun on onnistuttava niin, että mahdollisimman moni jätetty reservitarjous hyväksytään. (Fingrid 2025a.)

Jos todennettu reservikapasiteetti on pienempi, kuin hyväksytyjen kapasiteettitarjoustensa summa, toimittamatta jääneestä kapasiteetista ei makseta kapasiteettikorvausta. Maksamattoman kapasiteettikorvauksen lisäksi reservitoimittaja maksaa Fingridille sanktiota. FFR ja FCR reserveistä sanktio määräytyy seuraavasti:

- toimittamaton reservikapasiteetti (MW,h) x 3 x kapasiteettimarkkinan hinta (€/MW/h).

Sanktion määräytymiseen aFRR ja mFRR reserveillä on kaksi vaihtoehtoa:

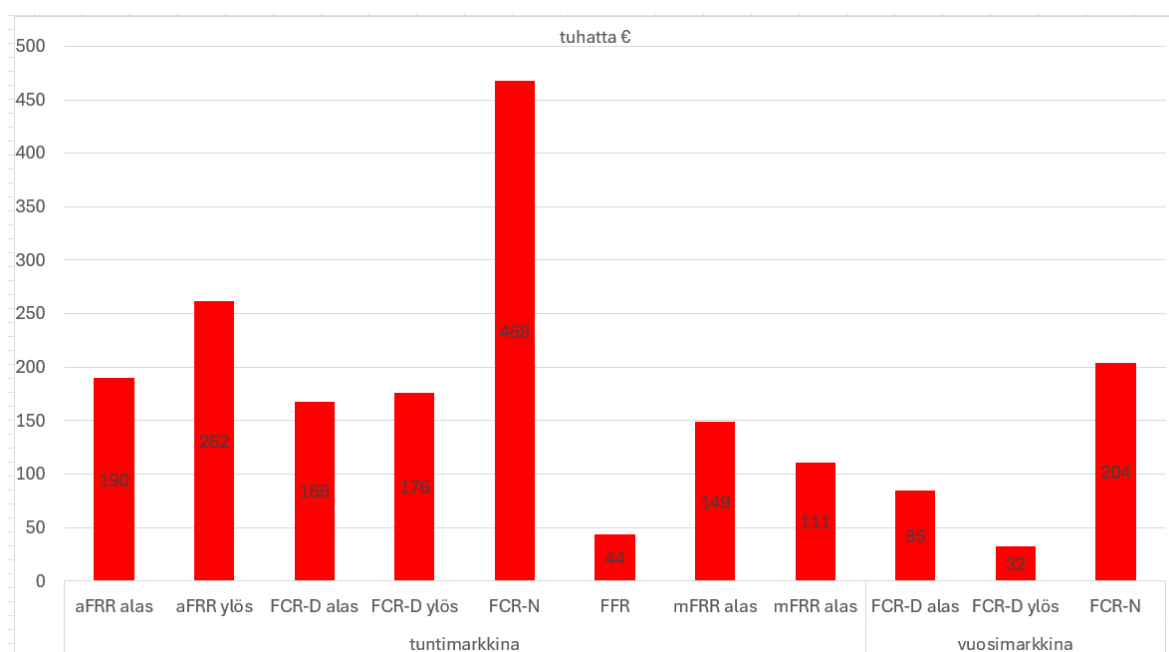
- toimittamaton reservikapasiteetti (MW,h) x 3 x kapasiteettimarkkinan hinta (€/MW/h)

- toimittamaton reservikapasiteetti (MW,h) x Suomen tarjousalueen vuosimarkkinoiden hinta (€/MW,h)

Sanktio määräytyy sen vaihtoehdon perusteella, kumpi on suurempi. (Rinne 2024, 181–195.)

Aktivoitunteesta säätöenergiasta maksettava korvaus perustuu aFRR ja mFRR reserveilla energiemarkkinoilla määräytyvään marginaalihintaan ja aktivoinnista syntyvään energiaan. Marginaalihinta määräytyy kalleimman valitun ylössäätötarjouksen ja halvimmän valitun alassäätötarjouksen perusteella. Fingrid maksaa energiamaksun reservitoimittajalle ylössäätötarjousten mukaisesti sovitusta energiasta. Alassäätötarjousten mukaisesti sovitusta energiasta reservitoimittaja maksaa Fingridille energiamaksun. (Fingrid 2024g; Rinne 2024, 190–193.)

FCR-N reservin energiamaksu määräytyy tasepoikkeaman hinnan ja aktivoinnista syntyvään energian perusteella. Aktivoinnista syntyvä energia riippuu ylläpidetystä FCR-N kapasiteetista ja toteutuneesta taajuuspoikkeamasta. Fingrid maksaa FCR-N reservitoimittajalle ylössäätöenergiasta ja reservitoimittaja maksaa Fingridille alassäätöenergiasta. (Rinne 2024, 193.)



Kuva 8. Yhden MW:n arvo eri reservimarkkinoilla (Kakkonen 2024, 24).

Kuvassa 8 on esitetty yhden megawatin reservikapasiteetin arvo eri reservimarkkinoilla. Kuvassa on jaoteltuna eri reservimarkkinatuotteet tuntimarkkinoilla sekä vuosimarkkinoilla. Hintatiedot ovat kapasiteettimarkkinoilta aikaväliltä 9/2023–8/2024. Kyseisellä aikavälillä suurimman rahallisen korvauksen on saanut osallistumalla FCR-N tuntimarkkinaan. (Kakkonen 2024, 24.)

2.6 Reservimarkkinoiden palveluntarjoajat

Säätökykyisen resurssin omistaja voi osallistua reservimarkkinoille myös avaimet käteen -palveluja tarjoavien yritysten avulla. Mikäli yrityksellä on halu osallistua reservimarkkinoille, mutta ei kykyä tai

aikaa ottaa selvää kaikista reservimarkkinoiden vaatimuksista, palveluntarjoaja voi tarjota apua. Palveluntarjoaja voi huolehtia, että Fingiridin asettamat ehdot ja asiakkaan mahdolliset omat vaatimukset ja tietoturvallisuuskriteerit täyttyy. (Välimäki 2024, 26–27.)

Palveluntarjoajien palveluja voidaan hyödyntää markkinoille tulon eri vaiheissa, tai antaa palveluntarjoajan huolehtia kaikesta. Esimerkiksi järjestelmien suunnitteluun ja käyttöönottoon on saatavilla apua. Yksi tärkeä osa-alue on reservikohteen operointi. Moni palveluntarjoaja tarjoaa tukea operointiin, että reservikohteen mahdollistamat tuotot saadaan maksimoitua. (Välimäki 2024, 26–27.)

Palveluntarjoajien tarkoitus on auttaa säätökykyisen resurssin omistajaa reservimarkkinoille osallistumisessa. Palveluntarjoaja tekee yhteistyötä Fingiridin kanssa helpottaakseen yritysten ryhtymistä jouston tarjoajiksi. (Välimäki 2024, 26–27.)

3 LIITYNTÄPISTEEN SÄHKÖTEKNISET VAATIMUKSET

Reservimarkkinoille liittymistä varten liityntäpisteen on täytettävä tietyt vaatimukset. Fingrid ylläpitää liittymisehtoja *Yleiset liittymisehdot YLE2021 (YLE)*, joiden avulla varmistutaan liitettävien verkkojen yhteensopivuudesta ja taataan sähköverkon käyttövarmuus. Liittymisehdoilla määritellään sähkölaitteiston liittämistapaan ja toimintaan liittyvät vaatimukset. Liittymisehdot koskevat kantaverkkoon suoraan liitettäviä liityntöjä ja myös kantaverkkoon liittyneeseen verkkoon kytkettyjä sähköverkkoja ja sähkölaitteistoja. Kantaverkkoon liittyvä liittyjä huolehtii sähköverkkoonsa liittyvien laitteistojen osalta ehtojen täyttymisestä. Liittymisehtoja on noudatettava, kun rakennetaan uusia sähköverkkoon liitettäviä liityntöjä. Olemassa olevia liityntöjä liittymisehdot koskevat lisäyksiä tai muutoksia tehtäessä. (Fingrid 2021, 5.)

Yleisten liittymisehtojen lisäksi sähköverkkoon liitettävän sähkölaitteiston tyyppi määrittää muut noudatettavat vaatimukset ja ehdot. Muut liittymisehdot on annettu erikseen neljälle erityyppiselle sähkölaitteistolle;

1. *Kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset (KJV)* antaa vaatimukset kulutus- ja jakeluverkkoliityntöille.
2. *Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset (VJV)* asettaa voimalaitosliityntöjen vaatimukset.
3. *Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset (SJV)* koskevat sähkövarastoliityntöjä.
4. *Suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien järjestelmätekniiset vaatimukset (HVDC)* antaa vaatimukset suurjännitteisille tasasähköyhteyksille. (Fingrid 2021, 5.)

3.1 Kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset

Kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset -asiakirja sisältää Suomen sähkönsiirtoverkkoon liitettäville jakeluverkoille ja kulutusyksiköille asetetut vaatimukset. Lisäksi KJV asiakirjan vaatimukset koskevat Suomen sähköjärjestelmään liitettäviä jakeluverkkoja ja kulutusyksiköitä, jotka tarjoavat kysyntäjoustopalveluita. KJV:n vaatimukset koskevat reservimarkkinoille osallistuvaa säätökykyistä kapasiteettia, joka tasapainottaa sähköverkon tilaa säätämällä kulutustaan. (Fingrid 2018a, 3.)

Reservimarkkinoille osallistuvien säätökykyisten kulutuskohteiden tulee täyttää KJV:n lukujen 9.2 ja 9.4 vaatimukset. Kulutusyksiköiden kyky täyttää vaatimukset todennetaan laitedokumentaatiolla ja reletiedoilla. (Fingrid 2018a, 29.)

Kulutusyksiköiden on toimittava normaalisti liittymispisteen verkonhaltijan määrittelemällä jännitealueella. Jännitealue on vähintään 0,90–1,05 pu normaalista viitejännitteestä. Lisäksi kulutusyksikön on kyettävä toimimaan 60 minuutin ajan, kun liittymispisteen jännite on 1,05–1,10 pu normaalista viitejännitteestä. Sähköjärjestelmän taajuuden ollessa 49,0–51,0 Hz, kulutusyksikön on pystyttävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti. Kulutusyksikön on toimittava 30 minuutin ajan taajuuden ollessa 51,0–51,5 Hz tai 47,5–49,0 Hz. (Fingrid 2018a, 20.)

Kulutusyksikön on jatkettava normaalia toimintaa taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2,0 Hz/s. Taajuuden muutosnopeuden mittaamiseen käytettävää suojalaitetta ei saa käyttää kulutusyksikön suojauksessa. Tällä estetään odottamaton irti kytkeytyminen normaalilla jännite-taajuustoiminta-alueella. (Fingrid 2018a, 21–22.)

3.2 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Voimalaitoksille asetetut järjestelmätekniset vaatimukset Suomessa löytyy asiakirjasta *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset*. (Fingrid 2018c, 5.) Tämä opinnäytetyö ei käsittele voimalaitoksia, joten VJV:n asettamiin vaatimuksiin ei ole aiheellista perehtyä tarkemmin.

3.3 Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset

Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset -asiakirja asettaa vaatimukset Suomen sähköjärjestelmään liitettäville suuntaajakytketyille sähkövarastoille, jotka tuottavat järjestelmäpalveluita. Sähkövarastot, jotka osallistuvat reservimarkkinoille, kuuluvat järjestelmäpalveluita tuottaviin sähkövarastoihin. (Fingrid 2020, 4.)

Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset koskevat tuotantotilan mitoitusteholtaan vähintään 0,8 kW tehoisia suuntaajakytkettyjä sähkövarastoja. Vaatimuksia on jaoteltu neljään eri tyyppiluokkaan tuotantotilan mitoitustehon ja liittymispisteen jännitetason mukaan. Tyyppiluokat on esitetty taulukossa 8. (Fingrid 2020, 8.)

Taulukko 8. Sähkövaraston tyyppiluokittelu tehon ja jännitteen perusteella (Fingrid 2020, 8).

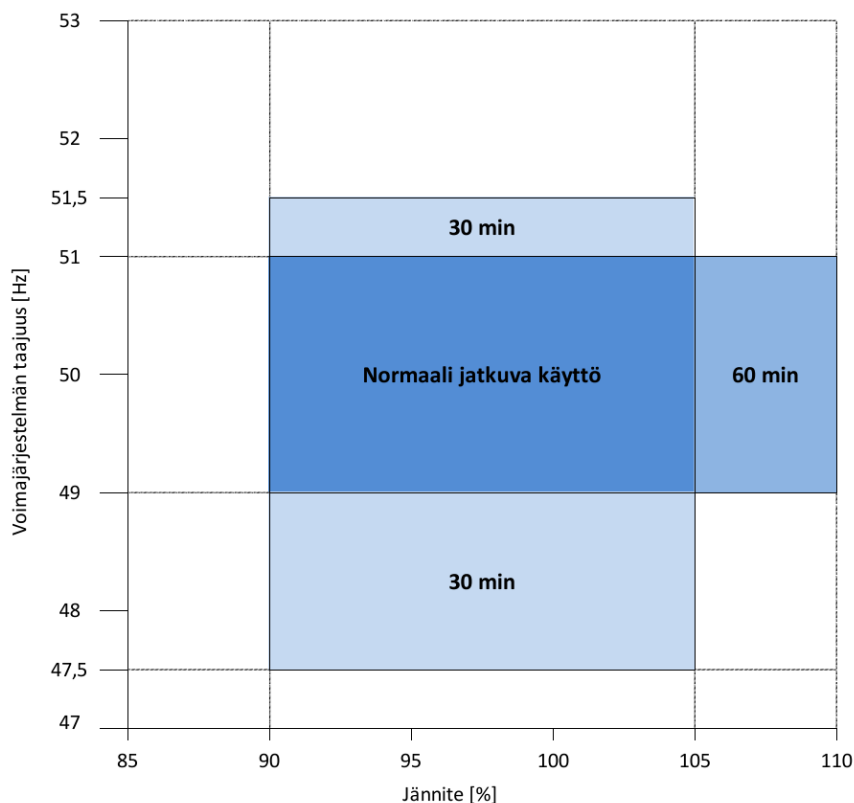
| Tyyppi-luokka | Liittymispisteen jännitetaso | Ehto | Sähkövaraston tuotantotilan mitoitusteho $P_{\max,p}$ |
|-----------------|--|------|--|
| Tyyppi A | Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV | ja | Sähkövaraston tuotantotilan mitoitusteho on vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW. ($0,8 \text{ kW} \leq P_{\max,p} < 1 \text{ MW}$) |
| Tyyppi B | Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV | ja | Sähkövaraston tuotantotilan mitoitusteho on vähintään 1 MW mutta alle 10 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{\max,p} < 10 \text{ MW}$) |
| Tyyppi C | Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV | ja | Sähkövaraston tuotantotilan mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 30 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{\max,p} < 30 \text{ MW}$) |
| Tyyppi D | Liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV | tai | Sähkövaraston tuotantotilan mitoitusteho on vähintään 30 MW. ($P_{\max,p} \geq 30 \text{ MW}$) |

Yleiset vaatimukset

Sähkövarastoille on annettu vaatimukset sähkövaraston jännite- ja taajuustoiminta-alueista sekä taajuuden muutosnopeuden sietokyvystä. Lisäksi SJV antaa vaatimukset etäohjausvalmiudelle, lähivikakestoisuudelle, suojaukselle, jännitestabiiliudelle ja sähkön laadulle. (Fingrid 2020, 30–38.)

Tyyppin A, B ja C sähkövarastojen on kyettävä normaaliin toimintaan liittymispisteen verkonhaltijan määrittelemällä jännitealueella. Taajuuden ollessa 49,0–51,0 Hz sähkövaraston on kyettävä toimimaan normaalisti. Kun sähköjärjestelmän taajuus on 51,0–51,5 tai 47,5–49,0 Hz, sähkövaraston on pystyttävä toimimaan 30 minuutin ajan. (Fingrid 2020, 30–34.)

Tyyppin D sähkövaraston pystyttävä normaaliin toimintaan, kun liittymispisteen jännite on 0,9–1,05 pu normaalista käyttöjännitteestä ja taajuus on 49,0–51,0 Hz. Tyyppin D sähkövaraston on pystyttävä toimimaan vähintään kuvassa 9 määritetyt ajat, jos jännite tai taajuus poikkeavat normaaleista rajoista. (Fingrid 2020, 35–35.)



Kuva 9. Tyyppin D sähkövaraston toiminta-ajat jännite ja taajuus poikkeamissa (Fingrid 2020, 36).

Sähkövarastojen on toimittava normaalisti, kun taajuuden muutosnopeus on alle 2,0 Hz/s. Järjestelmässä tapahtuvista häiriöistä johtuvat äkilliset muutokset jännitteen käyrämuodossa eivät saa aiheuttaa taajuuden muutosnopeuden tunnistavan suojalaitteen reagointia. Taajuuden muutosnopeutta koskeva vaatimus koskee kaikkia sähkövarastotyyppisiä (A, B, C ja D). (Fingrid 2020, 30–35.)

Tarkemmat ja yksityiskohtaisemmat vaatimukset sähkövarastojen etäohjaukselle, lähivikakestoisuudelle, sähkön laadulle ja sähkövarastojen suojaukselle löytyvät *Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset* -asiakirjasta. (Fingrid 2020, 30–35.)

Reaaliaikaiset mittaukset, tiedonvaihto ja instrumentointi

Reaaliaikaista mittausta ei vaadita tyyppin A sähkövarastosta. Tyyppin B, C ja D sähkövarastoista vaaditaan reaaliaikaiset pätö- ja loistehomittaukset sekä kytkinlaitteiden tilatiedot. Tietojen päivitys sykli

saa olla korkeintaan 60 s. Liittyjä toimittaa tiedot liittymistiedot liittymispisteen verkonhaltijalle, joka toimittaa tiedot edelleen Fingridille. (Fingrid 2020, 28.)

Tyyppin C ja D tulee reaaliaikaisen mittauksen lisäksi asentaa häiriö- ja heilahtelutallentimet. Tallentimilla tallennetaan sähkövaraston ja sen säätäjien toimintaa häiriö- ja muutostilanteissa. Häiriö- ja heilahtelumittaukset voidaan toteuttaa erikseen asennettavilla tai releisiin integroiduilla häiriötallentimilla. (Fingrid 2020, 28.)

3.4 Suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien järjestelmätekniset vaatimukset

Suomen sähköjärjestelmään liitettäville suurjännitteisille tasasähköjärjestelmille on asetettu vaatimukset asiakirjassa *Suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien järjestelmätekniset vaatimukset*. Suurjännitteiset tasasähköjärjestelmät eivät liity tähän opinnäytetyöhön, joten HVDC:n vaatimuksiin ei perehdytä sen tarkemmin. (Fingrid 2018b, 4.)

3.5 Reservikohteen mittalaitteiden vaatimukset

Taajuusohjattujen reservien mitta- ja rekisteröintilaitteille on asetettu vaatimukset mittaustarkkuuden osalta. Päätötehomittauksen vaatimukset tarkkuudelle, resoluutiolle ja näytteenottoajalle on esitetty taulukossa 9. Päätötehomittauksen vaatimukset tarkkuudelle vaihtelee 0,5–5 prosentin välillä. Reservikohteen nimellistehon ollessa alle 1,5 MW, sallittu epätarkkuus on 5 %. 1,5–10 MW:n tehoilla sallittu epätarkkuus on 1 %. Nimellisteholtaan yli 10 MW:n reservikohteilla sallittu epätarkkuus on 0,5 %. (Alanen 2024, 148; Fingrid 2023a, 10; Fingrid 2023c, 55–56.)

Taulukko 9. Taajuusohjattujen reservien vaatimukset päätötehomittaukselle (Alanen 2024, 148).

| Reservituote | FFR | FCR-N | FCR-D |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| Tarkkuus | 0,5–5 % | 0,5–5 % | 0,5–5 % |
| Resoluutio | 0,01 MW | 0,01 MW | 0,01 MW |
| Näytteenottoaika | 0,1 s | 0,2 s | 0,1 s |

Taulukossa 10 on esitetty vaatimukset taajuusohjattujen reservien taajuusmittaukselle. Taajuusmittauksen tarkkuus tulee olla vähintään 10 mHz kaikilla taajuusohjatuilla reserveilla. Resoluutio on viidestä kymmeneen mHz ja näytteenottoaika 0,1 tai 0,2 sekuntia, riippuen reservituotteesta. (Alanen 2024, 148.)

Taulukko 10. Taajuusohjattujen reservien vaatimukset taajuusmittaukselle (Alanen 2024, 148).

| Reservituote | FFR | FCR-N | FCR-D |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Tarkkuus | 10 mHz | 10 mHz | 10 mHz |
| Resoluutio | 10 mHz | 5 mHz | 5 mHz |
| Näytteenottoaika | 0,1 s | 0,2 s | 0,1 s |

3.6 Reservikohteen tiedonsiirron vaatimukset

Fingrid edellyttää reservitoimittajaa toimittamaan reaaliaikaisia tietoja Fingridille. Tilatietojen toimitustavat ovat FEN- tai KoVa-FEN-verkko (ICCP- tai IEC 60870-5-104 –protokolla) ja web-tiedonsiirto. Toimitustapana aFRR reservissä on ainoastaan ICCP protokolla. FEN/KoVa FEN verkkoyhteyden

toimittaa Suomessa Erillisverkot Oy tai Volue Oy. Reservitoimittaja voi huolehtia reaaliaika tiedonsiirtoyhteyden luomisesta itsenäisesti tai käyttää apuna palveluntarjoajaa. Mikäli reservitoimittaja käyttää palveluntarjoajaa, toimittaja järjestää ensin tiedonsiirtoyhteyden palveluntarjoajalle, joka hoitaa kaiken tarvittavan kommunikoinnin Fingridin kanssa. (Fingrid 2025c, 24.)

Reservikohteelle on määritelty Fingridin toimesta vaatimukset toimitettavista signaaleista. Vaaditut signaalit ovat saatavilla Fingridin *Reservien tiedonvaihto –signaalilistassa*. Toimitettavat signaalit on esitetty kootusti taulukossa 11. (Fingrid 2025c, 24.)

Taulukko 11. Reservikohteiden tiedonsiirtovaatimukset, vaaditut signaalit (Fingrid 2025c, 25–26).

| | FFR | FCR-N | FCR-D ylös | FCR-D alas | aFRR ylös | aFRR alas | mFRR |
|---|------|-------|---------------|---------------|--------------|--------------|------|
| Tiedonvaihdon päivitysväli enintään | 60 s | 60 s | 60 s | 60 s | 10 s | 10 s | 60 s |
| Ylläpidettävä reservimäärä (MW) | x | x | x | x | x | x | |
| Hetkellinen pätöteho (MW) | x | x | x | x | x | x | x |
| Aktivoituneen reservin määrä (MW) | | | | | x | x | |
| Fingridin lähettämän aktivointisignaalin takaisinlähetys | | | | | x | x | |
| Fingridin lähettämän watchdog-signaalin takaisinlähetys, tiedonvaihdon päivitysväli 4 s | | | | | x | x | |

Taulukossa esitettyjen toimitettavien signaalien lisäksi sääriippuvista kohteista on toimitettava saatavilla oleva pätöteho. Tämä koskee FFR, FCR ja aFRR reservejä. Saatavilla olevan pätötehon tiedonvaihdon päivitysväli on 10 sekuntia. Lisäksi rajallisen aktivointikyvyn reservikohteista (LER) on toimitettava jäljellä oleva aktivointikyky (min). Se kertoo käytettävissä olevalla energiamäärällä, kuinka pitkään reservikohde pystyisi aktivoimaan reservikapasiteetin. Jäljellä oleva aktivointikyky toimitetaan erikseen FCR-N, FCR-D ylös ja FCD-D alas reserveistä. (Fingrid 2025c, 25–26.)

4 RESERVIMARKKINOILLE SOVELTUVAT RESURSSIT

Reservimarkkinoille soveltuvat hyvin monipuolisesti erilaiset säätökykyiset resurssit. Riippuen reservituotteen vaatimuksista, reserveiksi soveltuu sähkövarastot, teollinen- ja pienkulutus, tuulivoima, vesivoima ja lämpövoima. Kuvassa 10 on jaoteltu eri reserveiksi soveltuvat säätökykyiset resurssit. (Fingrid 2023b, 6.) Tämä opinnäytetyö keskittyy akkuvarastoihin ja sähkökattiloihin, joten niiden soveltuvuutta eri reserviresursseiksi käsitellään tulevissa alaluvuissa tarkemmin.



Kuva 10. Eri teknologioiden soveltuvuus reservituotteisiin (Fingrid 2023b, 6).

4.1 Akkuvarastot

Akkuvarasto on kiinteä sähköverkkoon kytketty akku tai akusto. Akkuvarastoista käytetään usein sen englannin kielestä johdettua lyhennettä: BESS (battery energy storage system). Akkuvarasto voi koostua seuraavista osista:

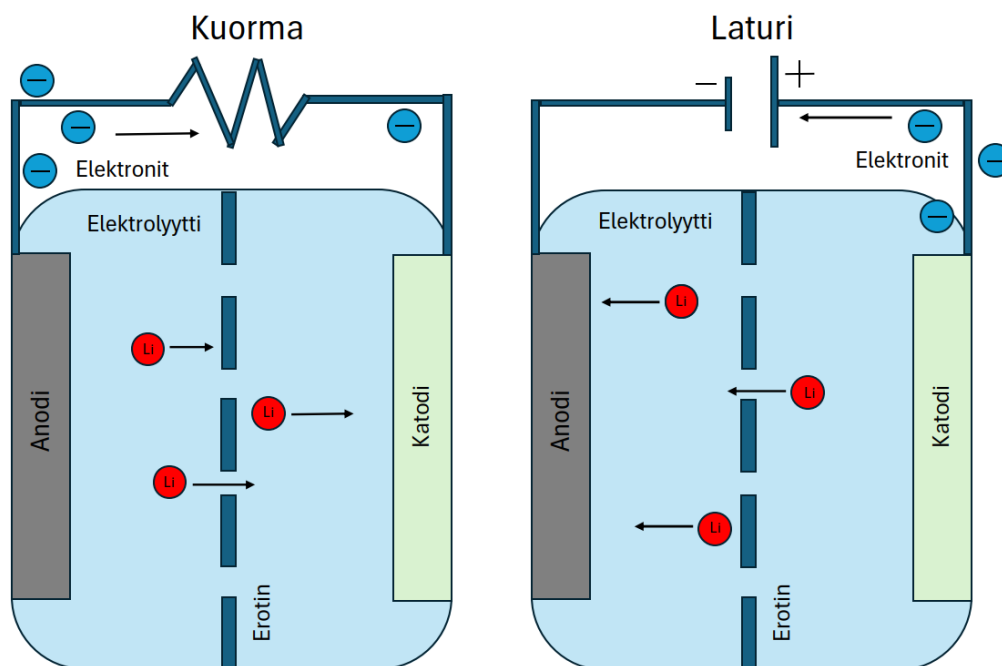
- akusto; akkukennot ja akunhallintajärjestelmät
- lämmönhallintajärjestelmät
- sammutusjärjestelmät
- muut apujärjestelmät
- varaajat eli latauslaitteet
- verkkovaihtosuuntaajat
- kaapeloinnit
- maadoitukset
- yhteydet sähkön tuotantojärjestelmään
- yhteydet sähkön pääjakelujärjestelmään
- yhteydet rakennusautomaatiojärjestelmään
- pääkytkin pelastuslaitosta ja jakeluverkon operaattoria varten

Akkuvarastoon kuuluvien osien määrä voi vaihdella varaston koon ja laajuuden mukaan. (ST-käsikirja 42, 7.)

Eri akkutyyppejä voidaan laajasti käyttää reservimarkkinoilla, mutta opinnäytetyössä keskitytään litiumioni pohjaisiin akkuihin niiden suuren markkinaosuuden takia. Vuonna 2021 maailmanlaajuisesti

kaikkien sähköverkkoon kytkettyjen akkujen kapasiteetista 93 % oli litiumioniakkuja. Muita akkutyyppejä ovat esimerkiksi: litiumilma-akku, lyijyakku, natriumioniakku ja virtausakku. (Bielewski ym. 2022, 3–16.)

Litiumioniakku koostuu katodista (positiivinen elektrodi), anodista (negatiivinen elektrodi), elektrolyytistä ja erottimesta. Litiumioniakkua purettaessa litiumionit liikkuvat anodilta katodille elektrolyyttiä pitkin. Samaan aikaan elektronit virtaavat akkuun kytketyn ulkoisen virtapiirin läpi luoden sähkövirran virtapiiriin. Ladattaessa akkua sama prosessi tapahtuu päinvastaisessa järjestyksessä. Ulkoisen latauslaitteen sähkövirran ansiosta saadaan litiumionit virtaamaan katodilta takaisin anodille. Akun purku- ja latausprosessia on kuvattu kuvassa 11. (Hafeez ym. 2024, 9–11.)



Kuva 11. Akun purkaminen ja lataaminen (mukaillen Hazeef ym, 2024, 10).

Litiumioniakkujen etuna on suhteellisen suuri energiatiheys. Ne ovat kevyempiä kuin useimmat muut akut. Litiumioniakkujen itsepurkautuminen on vähäistä ja ne varautuvat nopeasti. Litiumioniakkujen haasteena on kolhiintuminen, ylikuumentuminen tai huonon laadun aiheuttama oikosulkuriski ja siitä seuraava tulipalon vaara. (ST-käsikirja 42, 8.)

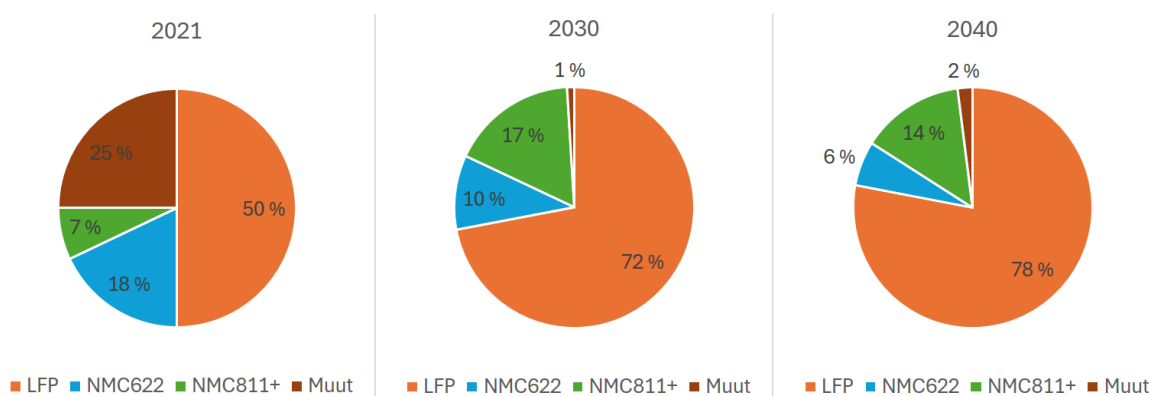
Litiumioniakut voidaan jakaa tarkemmin omiin kategorioihinsa akkukemioiden perusteella. Akkujen ominaisuudet riippuvat käytetystä katodi- ja anodimateriaalista sekä akun elektrolyytistä. Yleisimpien akkukemioiden ominaisuuksia on listattu taulukkoon 12.

Taulukko 12. Yleisimpien akkukemioiden edut ja haitat (Bielewski ym. 2022, 3; ST-käsikirja 42, 14).

| | edut | haitat |
|---|--|---|
| LFP (litium-rautafosfaatti) | suhteellisen halpa, kestävä, verrattain turvallinen | energiatiheys huonompi kuin NMC- ja NCA-kemioilla, huono kierrätysarvo |
| NMC111* (Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi) | hyvä energiatiheys, suuri purkunopeus, hyvä kierrätettävyyys | suhteellisen kallis, epävakaampi LFP-kemiaan verrattuna |
| NMC622* (Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi) | hyvä energiatiheys, suuri purkunopeus, hyvä kierrätettävyyys | suhteellisen kallis, epävakaampi LFP-kemiaan verrattuna |
| NMC811* (Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi) | hyvä energiatiheys, suuri purkunopeus, hyvä kierrätettävyyys | suhteellisen kallis, epävakaampi LFP-kemiaan verrattuna |
| NCA (Litium-Nikkeli-Koboltti-Alumiinioksidi) | hyvä energiatiheys, pitkäikäinen, hyvä kierrätettävyyys | suhteellisen kallis, huonompi kestävyys ja epävakaampi NMC-kemiaan verrattuna |
| LTO (Litium-Titanaatti) | erittäin kestävä, turvallinen, nopeasti ladattava | kallis, huono energiatiheys |

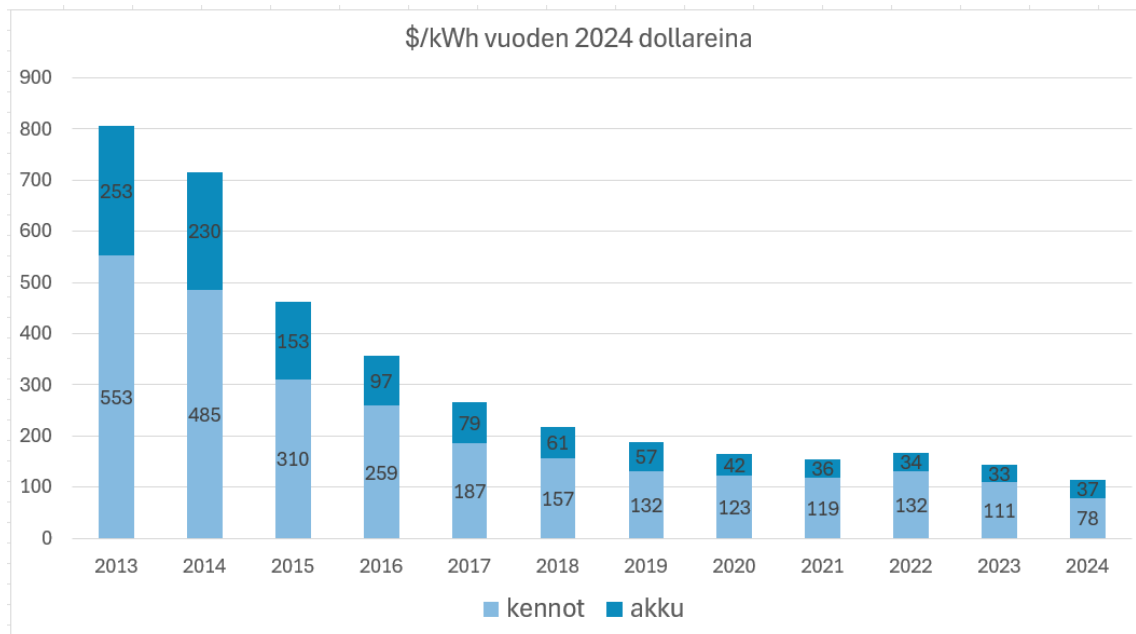
*NMC akkujen numerosarja kertoo käytetyn nikkelin, mangaanin ja koboltin suhteesta

Kiinteästi sähköverkkoon kytketyissä litiumioni akkuvarastoissa yleisin käytössä oleva akkukemia on LFP (litium-rautafosfaatti). LFP:n osuus oli jo vuonna 2021 50 % kaikista litiumioni akkuvarastoista ja sen osuuden ennustetaan kasvavan, kun uusia akkuvarastoja liitetään sähköverkkoon. Seuraavaksi yleisimpinä kemioina ovat NMC811+ ja NMC622. Akkukemioiden osuudet on eritelty tarkemmin kuvassa 12. Sähköverkkoon liitettyjen akkuvarastojen kokonaiskapasiteetti on voimakkaassa kasvussa. Vuonna 2020 asennettua kapasiteettia oli viisi gigawattituntia ja vuonna 2040 asennettua kapasiteettia on ennusteiden mukaan jo 348 GWh. (Bielewski ym. 2022, 17.)



Kuva 12. Akkukemioiden osuudet kiinteästi asennetuissa akkuvarastoissa (Bielewski ym. 2022, 17).

Akkujen hinnat ovat laskeneet huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Akkujen kysynnän kasvusta seurannut tuotantomäärien kasvu on ollut merkittävä tekijä hintojen laskussa. Hintojen suhteellinen lasku on hidastunut 2020-luvulla raaka-aineiden hinnan vastaantulon takia. Kuvan 13 hinnat sisältävät kiinteästi sähköverkkoon liitettyjen akkujen ja erilaisten sähköajoneuvojen akkujen hinnat ilman erittelyjä. (Bielewski ym. 2022, 22.)



Kuva 13. Litiumioniakkujen hintakehitys vuosina 2013–2024 (BloombergNEF 2024).

Kuvan hintatietojen lisäksi huomionarvoista on, että LFP akkujen hinnat ovat lähes 30 % matalammat NMC akkujen hintoihin verrattuna. Koko energiavaraston hinnat ovat suuremmat kuin pelkkien akkujen hinnat, koska energiavarastoihin kuluu myös esimerkiksi sähköjakelu ja energianhallintajärjestelmät. (Bielewski ym. 2022, 22; ST-käsikirja 42, 13.)

4.2 Akkuvaraston liittäminen sähköverkkoon

Akkuvarastojen liittämisen sähköverkkoon on huomioitava erityispiirteet saarekekäyttöön, suojaukseen, mitoitukseen ja tasasähköön liittyen. Akkuvarastoihin liittyvissä sähkötöissä on noudatettava sähköturvallisuusmääräyksiä. Lisäksi akustoihin liittyvät standardit, vaatimukset ja valmistajan ohjeet on otettava huomioon. (ST-käsikirja 42, 29.)

Saarekekäytöllä tarkoitetaan jännitteistä sähkölaitteistoa, joka ei ole osa yleistä sähköjakeluverkkoa. Saareke on siis verkosta erillään oleva itsenäinen osa. Jos akkuvarasto muodostaa saarekekäyttötilanteen, saarekkeen sähköjakelun suojaukset ovat akkutilanteen varassa. Akkuvaraston syöttämät rajalliset oikosulkuvirrat eivät välttämättä riitä vian poiskytkennän vaatimuksien toteuttamiseen. Ongelman kiertämiseksi saarekekäytössä voi tulla kyseeseen laajat vikavirtasuojaukset. Toinen vaihtoehto on käyttää akkuvaraston invertterin suojaustoimintoja. (ST-käsikirja 42, 29–32.)

Akkuvarastojen vaikutukset keskusten mitoitukseen ja lämpenemien hallintaan on huomioitava suunnittelussa. Akkuvaraston kytkentäpisteessä, esimerkiksi jakokeskuksessa, on tehtävä mitoitus kahden tai useamman teholähteen syöttämien tehojen mukaan. Keskuksien mitoitus on riittävästi suuri ylikuormituksen ja liiallisen lämpenemisen ehkäisemiseksi. (ST-käsikirja 42, 36–37.)

Tasasähkön erityispiirteet aiheuttavat omat vaatimuksensa akkuvarastojen suojalaitteille vaihtosähkölajitelmiin verrattuna. Useimmat katkaisijat toimivat sekä tasa- että vaihtovirralla, mutta niiden laukaisukäyrät ja jännitekestoisuudet eroavat tasa- ja vaihtosähköpiireillä. Vaihtosähkölajitelmissä oikosulkuvirralla on luonnollinen nollakohta 100 kertaa sekunnissa 50 Hz taajuudella. Tasasähkölajitelmissä ei vastaavaa nollakohtaa ole. Koska tasasähköllä katkaisijan elektrodien välillä on jatkuva virta, tulee katkaisijan avausvälin olla riittävän suuri, jotta valokaari saadaan sammumaan. (ST-käsikirja 42, 37–38.)

4.3 Akkuvarastot reservimarkkinoilla

Akkuvarastot soveltuvat reservimarkkinoille hyvin niiden nopean reagoinnin ja tarkan ohjattavuuden takia. Akkuja voidaan käyttää helposti ylös- ja alassäätöön. Akkuvarastot soveltuvat teknisiltä ominaisuuksiltaan kaikkien eri reservien tuottamiseen. Toistaiseksi akut ovat osallistuneet erityisesti taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin tuottamiseen. (Cactos 2024.)

Akkuvarastojen kyky riittävän nopeaan reagointiin ei tuota ongelmia, mutta akkuvarastojen mitoituksessa on huomioitava vähimmäisvaatimukset yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille täydellä reserviteholla. Akkuvaraston energiakapasiteetin mitoitukseseen on vähimmäisrajat esitetty kuvassa 14. Kuvassa on vähimmäismitoitus yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille täydellä reserviteholla. Energiakapasiteettia mitoitettaessa on otettava huomioon akun ikääntymisestä johtuva kapasiteetin heikkeneminen. Mikäli reservimarkkinoille halutaan osallistua vielä akun elinkaaren loppupäässä, on kapasiteetti ylimitoitettava uutta akkuvarastoa suunniteltaessa. (Fingrid 2023b, 21; Astero ja Evens 2020, 5.)

| | | |
|---|---|----------------------------------|
|  | Nopea taajuusreservi | 5–30 s |
|  | Taajuusohjattu häiriöreservi | 20 min |
|  | Taajuusohjattu käyttöreservi | 1h (sekä ylös- että alassäätöön) |
|  | Automaattinen taajuuden palautusreservi | 1 h |
|  | Säätösähkömarkkinat | 1 h |
|  | Säätökapasiteetti -markkinat | 3 h |

Kuva 14. Reservikohteen aktivointikyvyn mitoitus (Fingrid 2023b, 21).

Reservimarkkinoille voi osallistua teollisen kokoluokan akuilla tai aggregoiduilla pienakuilla. Energiavarastojen osuus on ollut voimakkaassa kaskussa reservimarkkinoilla viimeisen kahden vuoden aikana. Etenkin automaattisten reservien markkinoilla akkuvarastot ovat yleistyneet. Taulukossa 13 on säätökokein todennettu energiavarastojen kapasiteetti automaattisissa reserveissa. Tilanne on helmikuulta 2025. Vaikka reservien hankintamäärät ovat kasvussa, jokainen yksittäinen reservimark-

kina on melko pieni. Siksi on suositeltavaa olla kyvykäs osallistumaan mahdollisimman monelle reservimarkkinalle. Useammalle markkinalle osallistumalla voi lisätä yhden reservikohteen ansaintamahdollisuuksia. (Kujansuu 2025, 3–4.)

Taulukko 13. Energiavarastojen kapasiteetti automaattisissa reserveissa (Kujansuu 2025, 4).

| | FFR | FCR-D ylös | FCR-D alas | FCR-N | aFRR ylös ja alas |
|-------------------------------------|--------|------------|------------|--------|-------------------|
| Kapasiteetti | 102 MW | 133 MW | 130 MW | 117 MW | 40 MW |
| Osuus kokonaiskapasiteetista | 54 % | 13 % | 18 % | 29 % | 8 % |

Riippuen reservituotteesta akkuvarastojen ohjaaminen perustuu joko taajuusmittaukseen tai aktiivointisignaaliin. Taajuusohjatuissa reserveissa (FFR, FCR-N ja FCR-D) ohjaus perustuu taajuusmittauksen havaitsemaan taajuuspoikkeamaan. Taajuudenpalautusreserveissa (aFRR ja mFRR) ohjaus tapahtuu Fingridin lähettämän aktiivointisignaalin/elektronisen aktivoinnin avulla. Akunhallintajärjestelmä säätelee akkuvaraston syöttämää tai ottamaa tehoa taajuusmittauksen tai aktiivointisignaalin perusteella. (Fingrid 2022; Fingrid 2023a; Fingrid 2023c; Fingrid 2024g; ST-käsikirja 42, 2–3.)

4.4 Sähkökattilat

Sähkökattilat tuottavat kuumaa vettä tai höyryä sähköllä. Sähkökattiloiden kyky säätää tehoaan lähes välittömästi on etuna perinteisiin voimalaitoksiin verrattuna. Sähkökattilat soveltuvatkin hyvin säätökykyiseksi kulutukseksi reservimarkkinoille. Sähkökattiloiden teho voi vaihdella joistain kilowatteista jopa kymmeneen megawatteihin. (Finess Energy Oy 2024.)

Sähkökattiloiden avulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja osittain juuri sen takia sähkökattilat ovat yleistyneet viime vuosina. Sähkökattiloilla on korvattu kaukolämmön tuotantoa sekä höyryn tuotantoa eri teollisuuden aloilla. Päästöjen vähentämisen lisäksi sähkökattiloiden avulla turvataan teollisuuslaitosten toimitusvarmuutta. (Motiva Oy 2024, 10.)

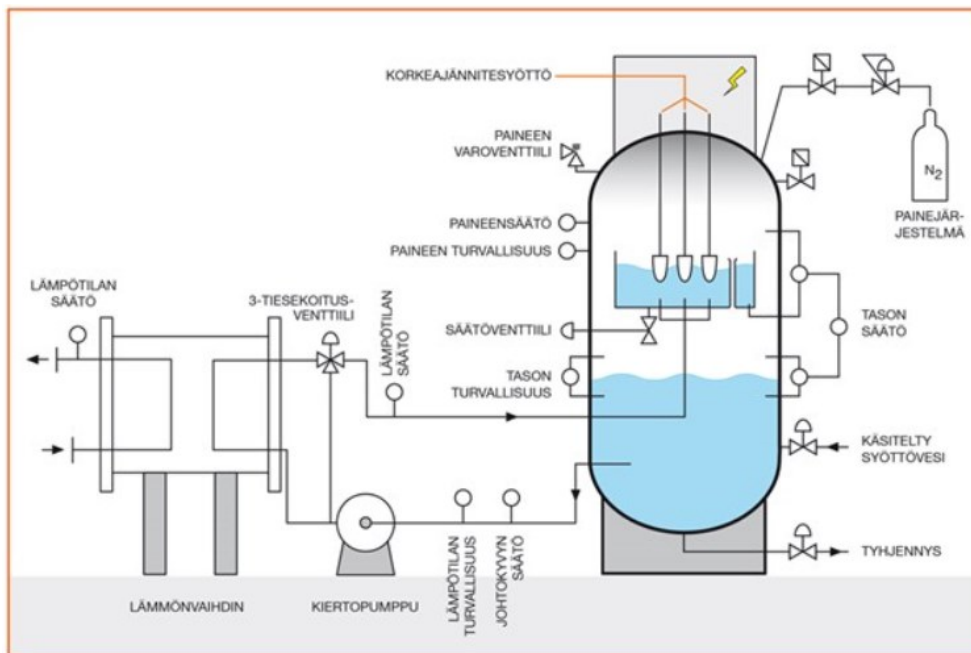
4.4.1 Vastuskattilat

Vastuskattilat ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia. Niillä vettä lämmitetään perinteisillä sähkövastuksilla, joiden määrä riippuu kattilan tehosta. Vastuskattilat toimivat 400 V tai 690 V jännitteillä. Jännitteen takia suurilla tehoilla virrat kasvavat suuriksi, joka kasvattaa esimerkiksi muuntajien ja sähkökeskusten investointikustannuksia. Vastuskattilan etuna on sen yksinkertainen tekniikka, jonka ansiosta huolto- ja käyttökustannukset ovat alhaiset. (Danish Energy Agency 2016, 308; Motiva Oy 2024, 11.)

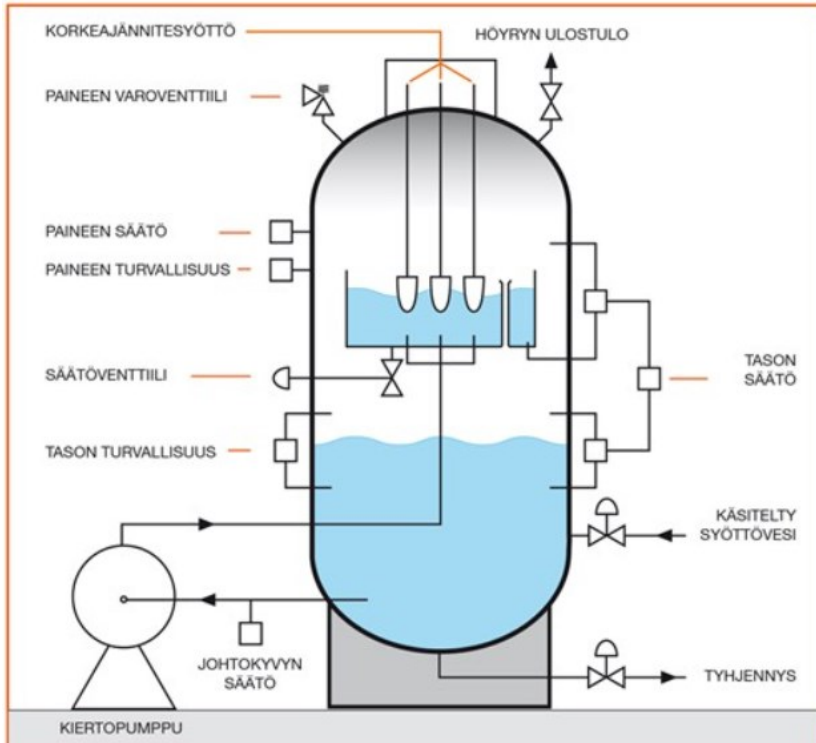
4.4.2 Elektrodikattilat

Elektrodikattilalla vettä lämmitetään veden läpi johdettavalla sähkövirralla. Sähkövirta johdetaan veden läpi korkeajännitteiseltä elektrodilta toiselle. Käytettävä jännite voi olla esimerkiksi 10–15 kV, mutta se riippuu paikallisesti saatavilla olevasta jännitteestä. Elektrodikattilalla voidaan tuottaa kuumaa vettä, höyryä tai molempia. Elektrodikattilan tehoa säädetään muuttamalla veden pinnan kor-

keutta suhteessa elektrodeihin. Mitä syvemmällä elektrodit uivat vedessä, sitä suurempi lämmitys-teho saadaan aikaiseksi. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty kuumaa vettä ja höyryä tuottavien elektrodikat-tiloiden periaatekaaviot. (Danish Energy Agency 2016, 306; Motiva Oy 2024, 11.)



Kuva 15. Elektrodikattilan kuumavesijärjestelmän periaatekaavio (Parat 2025).



Kuva 16. Elektrodikattilan höyryntuotantojärjestelmän periaatekaavio (Parat 2025).

Elektrodikattiloissa käytettävän veden pitää olla käyttöön sopivaa. Kattilassa käytettävän veden suo-lapitoisuus ja pH arvo pitää olla oikealla tasolla, veden oikean sähkönjohtokyvyn varmistamiseksi.

Tarvittavien vedenkäsittelylaitteistojen takia huolto- ja käyttökustannukset ovat korkeammat kuin vastuskattiloilla. (Motiva Oy 2024, 11.)

Elektrodikattilan ominaisuutena on pieni vedyn muodostuminen lämmitysprosessissa, kun sähkövirta kulkee veden läpi. Hapen kanssa vety voi sopivissa olosuhteissa muodostaa räjähtävän ilmaseoksen. Kuumaa vettä tuottavassa elektrodikattilassa räjähtävän ilmaseoksen muodostuminen on esitetty typpikäyttöisellä paineistusjärjestelmällä. Höyryä tuottavaan elektrodikattilaan muodostuva vety tuuletetaan pois kattilasta höyryn ulostuloventtiilistä. (Motiva Oy 2024, 11.)

4.5 Sähkökattilat reservimarkkinoilla

Sähkökattilat soveltuvat taajuusohjatuiksi käyttö- ja häiriöreserviksi (FCR-N, FCR-D alas ja FCR-D ylös) ja nopeaksi taajuusreserviksi (FFR). Myös aFRR ja mFRR reservimarkkinoille osallistuminen on mahdollista, kunhan huomioidaan säätökapasiteetin vähimmäiskoko. Toisin sanoen sähkökattila soveltuu teknologiana kaikkiin reserveihin. (Fingrid 2022; Fingrid 2023a; Fingrid 2023c; Fingrid 2024g.)

Riippuen käyttötavasta, sähkökattila kykenee sekä ylös- että alassäätöön. Mikäli sähkökattilaa käytetään FCR-D alas reservinä, kattila kytketään päälle, kun alassäätöä tarvitaan. Mikäli sähkökattilaa käytetään FCR-D ylös reservinä, kattila tuottaa lämpöä jatkuvasti, kunnes taajuuden ylössäätöä tarvitaan. Ylössäätöä tarvittaessa kattila kytketään pois päältä. FCR-N reservissä sähkökattilaa käytetään 50 %:n teholla, jolloin tehoa lisäämällä tai vähentämällä onnistuu sekä alas- että ylössäätö. Tämä edellyttää, että sähkökattilassa on riittävästi portaita tehon säätöä varten. Nopeassa taajuusreservissä sähkökattila toimii ylössäätönä pienentämällä tehon kulutusta, kun taajuus saavuttaa kynnyksarvon. (Fingrid 2023a; Fingrid 2023c.)

Reservimarkkinoille osallistuttaessa on huomioitava sähkökattilan ikä, teho ja aktivointikyky täydellä reserviteholla. Kaikki vanhemmat elektrodisähkökattilat eivät kykene riittävän nopeaan tehon säätöön osallistuakseen taajuusohjatuille reservimarkkinoille. Sähkökattilan tehon on oltava riittävän suuri täyttääkseen reservimarkkinan säädön vähimmäiskoon. Säädön vähimmäiskoot eri reservituotteille on esitelty aiemmin luvussa kaksi. Lisäksi on otettava huomioon vähimmäisvaatimukset yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille täydellä reserviteholla (kuva 14). Reservikohteen aktivoinnissa sähkökattilan tuottama lämpö on hallittava järkevästi. (Danish Energy Agency 2016, 309; Fingrid 2023b, 21.)

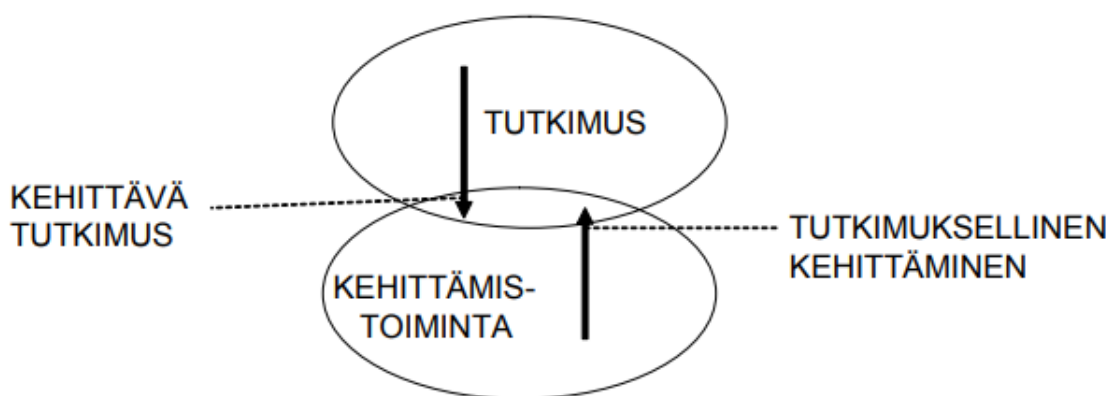
Sähkökattiloiden ohjaaminen reservimarkkinoilla tapahtuu taajuusmittauksella mitattavan taajuuspoikkeaman perusteella taajuusohjatuissa reserveissa (FFR, FCR-N ja FCR-N). Taajuudenpalautusreserveissa (aFRR ja mFRR) ohjaus tapahtuu Fingridin lähettämän aktivointisignaalin/elektronisen aktivoinnin avulla. Automaatiojärjestelmä vastaanottaa tiedon taajuuspoikkeamasta tai aktivointisignaalin ja ohjaa sen perusteella sähkökattilaa. (Fingrid 2022; Fingrid 2023a; Fingrid 2023c; Fingrid 2024g.)

5 TYÖN MENETELMÄLLINEN TOTEUTUS

Opinnäytetyö toteutettiin tutkimuksellisenä kehittämistyönä. Tutkimuksellisessa kehittämistyössä hyödynnetään määrällisen ja/tai laadullisen tutkimuksen aineistonkeruun ja analysoinnin menetelmiä. Saadun tutkimustiedon perusteella kehitetään käytäntöä. Tutkimustiedon keruun ja analysoinnin, sekä käytännön kehittämisen syklit voivat toistua peräkkäin. Tutkimuksellisessa kehittämistyössä kehittämistyöhön osallistuu myös toimijoita, joilta kerätään tietoa esimerkiksi haastatteluilla. (Luojuus 2022, 3–6.)

5.1 Tutkimuksellinen kehittämistyö

Tutkimuksellinen kehittämistoiminta yhdistää tutkimuksellisen lähestymistavan konkreettiseen kehittämistoimintaan. Tutkimus tuottaa uutta tietoa käytäntöön sovellettavaksi. Kehittämisessä taas sovelletaan tutkimuksen tuottamaa tietoa. (Toikko ja Rantanen 2009, 19.)



Kuva 17. Tutkimuksen ja kehittämistoiminnan risteyspaikka (Toikko ja Rantanen 2009, 21).

Tutkimuksellinen kehittämistoiminta on käsite, joka kuvaa tutkimustoiminnan ja kehittämistoiminnan välistä yhteyttä. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta kohdistuu tutkimuksen ja kehittämistoiminnan risteyspaikkaan. Tietoa pyritään tuottamaan käytännön ongelmien ja kysymyksien perusteella. Pääpaino on kehittämistoiminnassa, mutta siinä hyödynnetään tutkimuksellisia periaatteita. Tutkimukselliset menetelmät ovat apuna tiedon tuotannossa ja tietoa tuotetaan aidossa käytännön toimintaympäristössä. (Toikko ja Rantanen 2009, 21–22.)

Tutkimuksellisella kehittämistoiminnalla ei tavoitella ainoastaan kehittämistyön välittömiä tuloksia. Kehittämistoiminnan tulokset pyritään yleistämään laajempaan käyttöön. Tavoitteena ei ole vain yksittäisen kysymyksen tai ongelman ratkaisu, vaan ratkaisun välittäminen laajempaan keskusteluun. Tutkimuksellisessa kehittämistyössä tutkimus on avustavassa roolissa tiedonmuodostuksessa. (Toikko ja Rantanen 2009, 22–23.)

5.2 Aineiston hankinta ja analysointi

Opinnäytetyössä käytetty aineisto on hankittu internetlähteistä ja haastatteluilla. Reservimarkkinoita käsittelevä aineisto on suurelta osin Fingridin tuottamaa ja Fingridin verkkosivuilta löytyvää. Lisäksi tietoa aiheesta löytyi joistain artikkeleista ja Granlundin asiantuntijaa haastatteleamalla. Myös kulutuksen- ja sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset ovat Fingridin laatimaa dokumentaatiota.

Sähkökattiloita ja etenkin akkuvarastoja käsitteleviä tieteellisiä artikkeleita löytyi hyvin laajasti. Artikkeleiden tukena käytettiin valmistajien verkkosivuja ja esitteitä. Myös sähkökattiloiden ja akkuvarastojen sähkösuunnitteluun liittyvää tietoa kerättiin asiantuntijahaastattelulla.

Reservimarkkinoiden hintatietoja haettiin Fingridin *Avoim data* -palvelusta ja Reservituottolaskurista. Microsoft Excelillä muokattiin hintatietoja havainnollisempaan muotoon, sekä laskettiin takaisinmaksuaikoja.

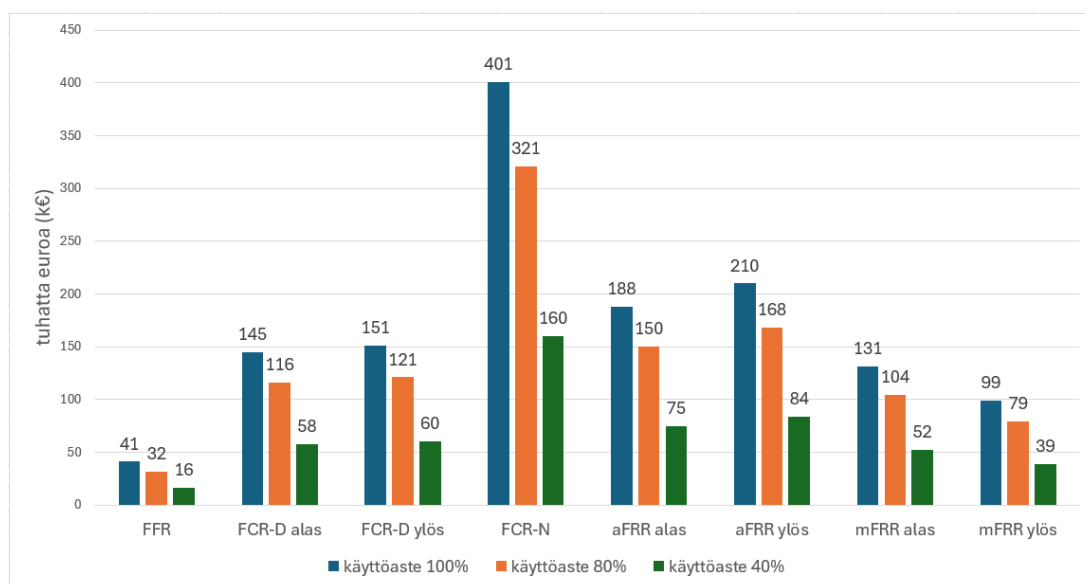
6 TULOKSET

6.1 Reservimarkkinakohteiden sähkösuunnittelu

Opinnäytetyön tuloksena saatiin ohje reservimarkkinakohteiden sähkösuunnitteluun. Ohjeessa on tietoa etenkin akkuvarastojen ja sähkökattiloiden sähkösuunnitteluun liittyen reservimarkkinakäytössä. Ohje on salassa pidettävä ja se on tarkoitettu vain Granlund Oy:n sisäiseen käyttöön.

6.2 Reservimarkkinoille osallistumisen taloudellisuus

Reservimarkkinoille osallistumisesta on voinut saada hyviä rahallisia korvauksia viime vuosina. Vuoden 2024 tuntimarkkinahinnoilla tuotto on voinut parhaimmillaan olla jopa satojatuhansia euroja yhden megawatin reservikyvyllä. Tuottoon vaikuttaa toteutuneet tuntimarkkinahinnat sekä reservikohteen käyttöaste. Jos reservitoimija ei saa omia tarjouksiaan läpi, jää tuotto silloin pienemmäksi. Oikea hinnoittelu on merkittävässä asemassa tuottojen maksimoinnissa. (Fingrid 2025e.)



Kuva 18. Potentiaaliset reservimarkkinatuotot 1 MW säätökyvyllä 2024 (Fingrid 2025e).

Kuvassa 18 on esitetty potentiaalisia tuottoja yhden megawatin säätökyvyllä vuonna 2024. Kuvassa on jokaiselle markkinapaikalle eritelty tuotot kolmella eri käyttöasteella. Käyttöaste kuvaa sitä, kuinka suurella osalla vuoden tunneista reservikohte on osallistunut reservimarkkinaan. Kaavion luvut perustuvat toteutuneisiin tuntimarkkinahintoihin, eivätkö ole tae tuotoista tulevaisuudessa. Tulevaisuudessa tuntimarkkinahinnat voivat vaihdella kysynnän ja tarjonnan mukaan. (Fingrid 2024c.)

Reservimarkkina investoinnin takaisinmaksuaika riippuu investoinnin arvosta, tuntimarkkinahinnoista ja reservikohteen käyttöasteesta. Vuoden 2024 tuntimarkkinahinnoilla on ollut mahdollista päästä hyvinkin lyhyihin takaisinmaksuaikoihin. Taulukoissa 14–16 on laskettu takaisinmaksuaikoja eriarvoisille investoinneille. Sarakkeissa on eritelty eri reservituotteet ja jokaisessa taulukossa on oletettu eri käyttöasteet reservikohteelle. Laskelmissa käytetyt tuntimarkkinahinnat on haettu Fingridin reservituottolaskurista yhden MW:n säätökyvyllä (Fingrid 2025e).

Taulukko 14. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 100 % (Fingrid 2025e).

| investoinnin arvo (€) | takaisinmaksuaika (a) | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|------------|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | FFR | FCR-D alas | FCR-D ylös | FCR-N | aFRR alas | aFRR ylös | mFRR alas | mFRR ylös |
| 100 000 | 2,4 | 0,7 | 0,7 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 1,0 |
| 200 000 | 4,9 | 1,4 | 1,3 | 0,5 | 1,1 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 300 000 | 7,3 | 2,1 | 2,0 | 0,7 | 1,6 | 1,4 | 2,3 | 3,0 |
| 400 000 | 9,8 | 2,8 | 2,6 | 1,0 | 2,1 | 1,9 | 3,1 | 4,0 |
| 500 000 | 12,2 | 3,4 | 3,3 | 1,2 | 2,7 | 2,4 | 3,8 | 5,1 |
| 600 000 | 14,6 | 4,1 | 4,0 | 1,5 | 3,2 | 2,9 | 4,6 | 6,1 |
| 700 000 | 17,1 | 4,8 | 4,6 | 1,7 | 3,7 | 3,3 | 5,3 | 7,1 |
| 800 000 | 19,5 | 5,5 | 5,3 | 2,0 | 4,3 | 3,8 | 6,1 | 8,1 |
| 900 000 | 22,0 | 6,2 | 6,0 | 2,2 | 4,8 | 4,3 | 6,9 | 9,1 |
| 1 000 000 | 24,4 | 6,9 | 6,6 | 2,5 | 5,3 | 4,8 | 7,6 | 10,1 |
| 1 500 000 | 36,6 | 10,3 | 9,9 | 3,7 | 8,0 | 7,1 | 11,5 | 15,2 |
| 2 000 000 | 48,8 | 13,8 | 13,2 | 5,0 | 10,6 | 9,5 | 15,3 | 20,2 |
| 3 000 000 | 73,2 | 20,7 | 19,9 | 7,5 | 16,0 | 14,3 | 22,9 | 30,3 |
| 5 000 000 | 122,0 | 34,5 | 33,1 | 12,5 | 26,6 | 23,8 | 38,2 | 50,5 |

Taulukko 15. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 80 % (Fingrid 2025e).

| investoinnin arvo (€) | takaisinmaksuaika (a) | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|------------|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | FFR | FCR-D alas | FCR-D ylös | FCR-N | aFRR alas | aFRR ylös | mFRR alas | mFRR ylös |
| 100 000 | 3,1 | 0,9 | 0,8 | 0,3 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 1,3 |
| 200 000 | 6,3 | 1,7 | 1,7 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 1,9 | 2,5 |
| 300 000 | 9,4 | 2,6 | 2,5 | 0,9 | 2,0 | 1,8 | 2,9 | 3,8 |
| 400 000 | 12,5 | 3,4 | 3,3 | 1,2 | 2,7 | 2,4 | 3,8 | 5,1 |
| 500 000 | 15,6 | 4,3 | 4,1 | 1,6 | 3,3 | 3,0 | 4,8 | 6,3 |
| 600 000 | 18,8 | 5,2 | 5,0 | 1,9 | 4,0 | 3,6 | 5,8 | 7,6 |
| 700 000 | 21,9 | 6,0 | 5,8 | 2,2 | 4,7 | 4,2 | 6,7 | 8,9 |
| 800 000 | 25,0 | 6,9 | 6,6 | 2,5 | 5,3 | 4,8 | 7,7 | 10,1 |
| 900 000 | 28,1 | 7,8 | 7,4 | 2,8 | 6,0 | 5,4 | 8,7 | 11,4 |
| 1 000 000 | 31,3 | 8,6 | 8,3 | 3,1 | 6,7 | 6,0 | 9,6 | 12,7 |
| 1 500 000 | 46,9 | 12,9 | 12,4 | 4,7 | 10,0 | 8,9 | 14,4 | 19,0 |
| 2 000 000 | 62,5 | 17,2 | 16,5 | 6,2 | 13,3 | 11,9 | 19,2 | 25,3 |
| 3 000 000 | 93,8 | 25,9 | 24,8 | 9,3 | 20,0 | 17,9 | 28,8 | 38,0 |
| 5 000 000 | 156,3 | 43,1 | 41,3 | 15,6 | 33,3 | 29,8 | 48,1 | 63,3 |

Taulukko 16. Takaisinmaksu vuoden 2024 hinnoilla, käyttöaste 40 % (Fingrid 2025e).

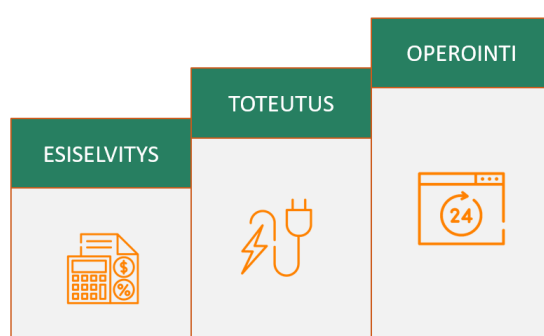
| investoinnin arvo (€) | takaisinmaksuaika (a) | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|------------|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | FFR | FCR-D alas | FCR-D ylös | FCR-N | aFRR alas | aFRR ylös | mFRR alas | mFRR ylös |
| 100 000 | 6,3 | 1,7 | 1,7 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 1,9 | 2,6 |
| 200 000 | 12,5 | 3,4 | 3,3 | 1,3 | 2,7 | 2,4 | 3,8 | 5,1 |
| 300 000 | 18,8 | 5,2 | 5,0 | 1,9 | 4,0 | 3,6 | 5,8 | 7,7 |
| 400 000 | 25,0 | 6,9 | 6,7 | 2,5 | 5,3 | 4,8 | 7,7 | 10,3 |
| 500 000 | 31,3 | 8,6 | 8,3 | 3,1 | 6,7 | 6,0 | 9,6 | 12,8 |
| 600 000 | 37,5 | 10,3 | 10,0 | 3,8 | 8,0 | 7,1 | 11,5 | 15,4 |
| 700 000 | 43,8 | 12,1 | 11,7 | 4,4 | 9,3 | 8,3 | 13,5 | 17,9 |
| 800 000 | 50,0 | 13,8 | 13,3 | 5,0 | 10,7 | 9,5 | 15,4 | 20,5 |
| 900 000 | 56,3 | 15,5 | 15,0 | 5,6 | 12,0 | 10,7 | 17,3 | 23,1 |
| 1 000 000 | 62,5 | 17,2 | 16,7 | 6,3 | 13,3 | 11,9 | 19,2 | 25,6 |
| 1 500 000 | 93,8 | 25,9 | 25,0 | 9,4 | 20,0 | 17,9 | 28,8 | 38,5 |
| 2 000 000 | 125,0 | 34,5 | 33,3 | 12,5 | 26,7 | 23,8 | 38,5 | 51,3 |
| 3 000 000 | 187,5 | 51,7 | 50,0 | 18,8 | 40,0 | 35,7 | 57,7 | 76,9 |
| 5 000 000 | 312,5 | 86,2 | 83,3 | 31,3 | 66,7 | 59,5 | 96,2 | 128,2 |

Reservimarkkinoille osallistuttaessa kannattaa ottaa huomioon yksittäisen reservimarkkinan suhteellisen pienen koon. Mitä useampaan reserviin voidaan osallistua, sitä todennäköisemmin säätökykyisellä resurssilla saadaan hyviä tuotteita. Lisäksi kannattaa miettiä muitakin käyttötarkoituksia resursseille, kuin reservimarkkinakäyttö. Sähkökatilloilla käyttötarkoitus on hyvin selvä: kuumen veden tai höyryn tuottaminen. Akkuvarastolle vaihtoehtoinen käyttötarkoitus voisi olla esimerkiksi varavoimakäyttö. (Kujansuu 2025, 3–4; ST-käsikirja 42, 3.)

Reservikohteen käytössä kannattaa aina huomioida millaisella operoinnilla voi saavuttaa suurimman taloudellisen hyödyn. Jos reservimarkkinoilta saatava korvaus on hyvin pieni, voisiko kohteen muusta käytöstä saada paremmin hyötyä? Jossain tilanteessa esimerkiksi korvaamalla jonkun toisen lämmöntuotantomuodon sähkökattilalla, voi polttoainekustannuksissa saavutettu säästö olla suurempi, kuin reservimarkkinoilta saatava tuotto. Tällaista hintojen ennustamista ja käytön optimointia varten on mahdollista käyttää koneoppimisen keinoja.

6.3 Granlund reservimarkkinoiden palveluntarjoajana

Granlund tarjoaa reservimarkkinapalveluita avaimet käteen -mallilla. Reservimarkkinoille liittymisen vaiheet voidaan suorittaa Granlundin toimesta aina esiselvityksestä toteutukseen ja operointiin asti. Granlundin tarjoamien palvelujen avulla asiakkaan ei tarvitse itse perehtyä reservimarkkinoihin niin syvällisesti. (Karvinen 2025.)

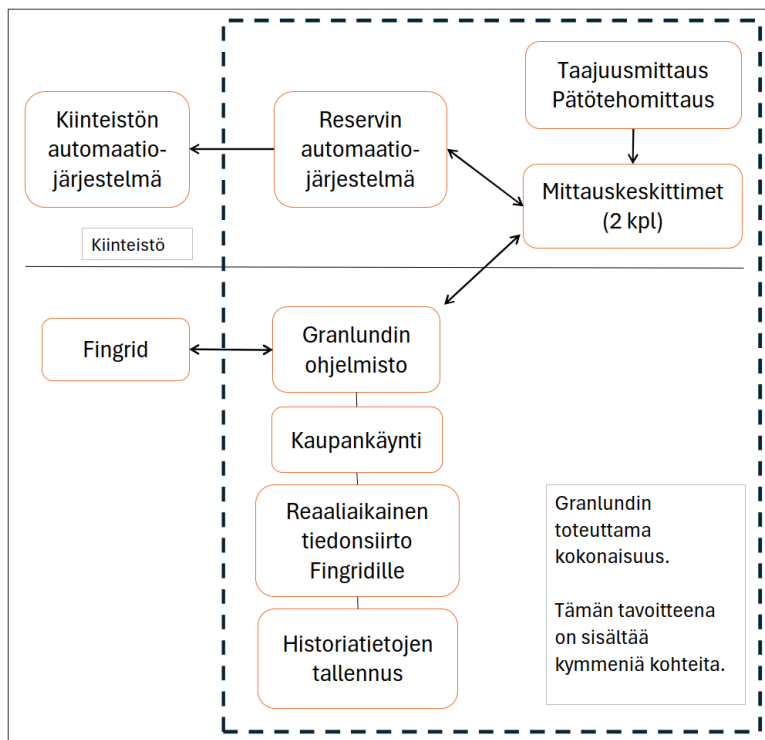


Kuva 19. Granlundin tarjoaman reservimarkkinakonseptin vaiheet (Karvinen 2025).

Esiselvitysvaiheessa tarkastellaan asiakkaan olemassa olevaa sähkön käyttöä ja mahdollista sähkön tuotantoa. Kohteesta kartoitetaan reservimarkkinoille soveltuvat säätökykyiset resurssit. Lisäksi voidaan selvittää, millaisilla investoinneilla kohteeseen voitaisiin rakentaa uutta säätökykyistä resursseja. Esiselvitys antaa tietoa tarvittavien investointien kustannuksista ja reservimarkkinoille osallistumisen taloudellisista hyödyistä. Esiselvityksen tarkoitus on antaa tukea asiakkaan päätöksenteolle reservimarkkinoille liittymisestä. (Karvinen 2025.)

Toteutusvaiheessa suunnitellaan järjestelmä, jolla osallistutaan reservimarkkinoille. Suunnittelussa otetaan huomioon Fingridin vaatimukset reservimarkkinakohteille. Muuten tarvittavat sähkö-, LVI ja automaatiojärjestelmät suunnitellaan normaalien vaatimusten mukaisesti. (Karvinen 2025.)

Operointivaiheessa Granlund vastaa kaupankäynnistä reservikohteella. Kaupankäyntiin liittyy tarjousten jättö, laskutus ja tuottojen maksu reservikohteen omistajalle. Granlund ottaa tuotoista operointipalkkiota ennakoon sovitun prosenttiosuuden verran. Kuvassa 20 on esitetty Granlundin toimintaa reservimarkkinoiden palveluntarjoajana. Granlund hallinnoi kaupankäyntiä omalla ohjelmistollaan. (Karvinen 2025.)



Kuva 20. Granlundin toiminta reservimarkkinoiden palveluntarjoajana (Karvinen 2025).

Granlundin tavoitteena on kasvattaa reservimarkkina-asiakkaidensa määrää kymmeneen kohteisiin tulevaisuudessa. Esiselvitysvaiheessa olevia kohteita on jo useita ja ainakin yksi kohde on jo toteutusvaiheessa menossa kohti operointia. (Karvinen 2025.)

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tarkasteltiin mahdollisuuksia osallistua Fingridin ylläpitämille reservimarkkinoille. Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Granlundin asiantuntijoille riittävän kattava tietopaketti reservimarkkinoista ja reservimarkkinoille liitettävien resurssien sähkösuunnittelusta. Reservimarkkinoille osallistumista lähestyttiin sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta.

Opinnäytetyön perusteella voidaan todeta, että akkuvarastot ja sähkökattilat soveltuvat hyvin reservimarkkinoille niiden helpon säädettävyyden ja nopean reagointikyvyn takia. Tehon ja energiakapasiteetin oikealla mitoittamisella akkuvarastot ja sähkökattilat soveltuvat kaikkiin Suomessa käytettäviin reserveihin.

Reservimarkkinakohteiden sähkösuunnittelussa on huomioitava ajantasaiset lait, asetukset ja standardit. Lisäksi reservikohteiden sähkösuunnitteluun liittyy Fingridin asettamat tekniset vaatimukset eri reservituotteille. Akkuvarastoja koskee myös sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset (SJV) ja sähkökattiloita kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset (KJV). Sähkösuunnittelussa erityispiirteinä juuri reservikohteiden suunnitteluun liittyy mittalaitteiden ja tiedonsiirron vaatimukset. Mittalaitteille on olemassa omat tarkkuusvaatimuksensa ja tiedonsiirrolla välitettävät signaalit on määritelty Fingridin toimesta.

Reservimarkkinoille osallistuvien resurssien takaisinmaksuajat voivat vuoden 2024 tuntimarkkinahintojen perusteella olla suhteellisen lyhyitä. Viime vuosien korvauksilla reservikapasiteetista, investoinnit ovat olleet hyvinkin kannattavia. Tuntimarkkinahintojen historiatiedot eivät kuitenkaan takaa vastaavia tuottoja tulevaisuudessa, joten riski kannattavuuden laskusta on otettava huomioon. Riskiä voi pienentää olemalla kyvykäs osallistumaan mahdollisimman monelle reservimarkkinalle.

Granlundin toiminta reservimarkkinoiden palveluntarjoajana eteni jo opinnäytetyöprosessin aikana. Granlund tarjoaa asiakkailleen palveluita esiselvityksistä reservikohteen operointiin saakka. Asiakkaan ei ole välttämätöntä perehtyä reservimarkkinoihin niin syvällisesti hankkiessaan tarvitsemansa palvelut avaimet käteen -mallilla.

Työn tuloksia voidaan pitää luotettavina sillä ne perustuvat Fingridin ylläpitämiin ajankohtaisiin ohjeisiin ja vaatimuksiin. Eettisesti tarkasteltuna opinnäytetyö ei aiheuta ongelmia sen teknisen luonteen takia. Työ keskittyy teknisiin ja taloudellisiin kysymyksiin, eikä kohdistu yksittäisiin henkilöihin tai arkaluontoisiin tietoihin.

Opinnäytetyön tulokset ovat suoraan hyödynnettävissä työn tilaajalla. Työ tarjoaa tietoa reservimarkkinoista hyvin kootussa muodossa aiheeseen ennestään perehtymättömille. Tuloksena saatu sähkösuunnitteluohje helpottaa reservimarkkinakohteiden suunnittelussa, koska se sisältää oleelliset asiat suunnitteluun liittyen. Laskelmat takaisinmaksuajoista voivat toimia investointipäätösten tukena. Opinnäytetyö tukee Granlund Oy:n tavoitteita lisätä palveluitaan reservimarkkinatoimijana.

Opinnäytetyöprosessin suorittaminen kehitti minua asiantuntijana. Opin tekemään tutkimuksellista kehittämistyötä ja sain paljon uutta tietoa reservimarkkinoihin liittyen. Onnistuin vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin ja sain laadittua sähkösuunnitteluohjeen. Jos käytettävissä olevaa aikaa olisi ollut enemmän, suunnitteluohjetta olisi voinut laajentaa ja tarkentaa vielä yksityiskohtaisemmalle tasolle.

Jatkotutkimusaiheiksi opinnäytetyötä tehdessä nousi akkuvarastoihin liittyvät turvallisuus- ja ympäristökysymykset. Akkujen kierrätys, hiilijalanjälki ja elinkaari ovat teemoja, joiden merkitystä nykyajan hiilineutraaliuteen pyrkivässä maailmassa ei voi ohittaa. Akkujen palo- ja kemikaaliturvallisuuteen liittyvät seikat ovat toinen kokonaisuus, joka vaatisi jatkotutkimusta. Mitä riskejä akkupaloihin liittyy ja miten niihin voitaisiin varautua, tai miten niiltä suojauduttaisiin?

LÄHTEET

- Alanen, E. 2024. Reservien tekniset vaatimukset ja säätökokeet. Reservimarkkinakoulutus. Fingrid 3.10.2024.
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>. Viitattu 20.2.2025.
- Astero, P. & Evens, C. 2020. Optimum Operation of Battery Storage System in Frequency Containment Reserves Markets. doi: 10.1109/TSG.2020.2997924. Viitattu 3.4.2025.
- Bielewski, M., Pfrang, A., Bobba, S., Kronberga, A., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O. & Grabowska, M. 2022. Clean Energy Technology Observatory: Batteries for energy storage in the European Union. doi:10.2760/808352, JRC130724. Viitattu 20.12.2024.
- BloombergNEF 2024. Litium-Ion battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour: BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>. Viitattu 2.2.2025.
- Cactos 2024. Mitä sähkön reservimarkkinat ovat ja miten niille voi osallistua? Verkkajulkaisu. <https://cactos.com/fi/artikkelit/reservimarkkinat>. Viitattu 20.12.2024.
- Cygnel, S. 2024. Tervetuloa reservimarkkinoille -lisäansioita sähköjärjestelmän tasapainottamisesta. Kantaverkkoyhtiön lehti 2024 (1), 12–17.
https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_1_2024.pdf. Viitattu 12.12.2024.
- Danish Energy Agency 2016. Technology Data – Energy Plants fo Electricity and District heating generation. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/technology_data_catalogue_for_el_and_dh_-_0013.pdf. Viitattu 13.3.2025.
- Finess Energy Oy 2024. Sähkökattilat ratkaisuna sähkön reservimarkkinoilla. STT Info verkkoartikkeli 28.5.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70192484/sahkokattilat-ratkaisuna-sahkon-reservimarkkinoilla?publisherId=69820076&lang=fi>. Viitattu 19.12.2024.
- Fingrid 2018a. Kulutuksen järjestelmätekniset vaatimukset KJV2018. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/20181212_kjv2018.pdf. Viitattu 13.2.2025.
- Fingrid 2018b. Suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien järjestelmätekniset vaatimukset HVDC2018. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/customers/grid-connection/suurjannitteisten-tasasahkojarjestelmien-jarjestelmatekniset-vaatimukset-hvdc2018.pdf>. Viitattu 13.2.2025.
- Fingrid 2018c. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>. Viitattu 13.2.2025.
- Fingrid 2020. Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset SJV2019. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/sahkovarastojen-jarjestelmatekniset-vaatimukset-sjv2019.pdf>. Viitattu 13.2.2025.
- Fingrid 2021. Yleiset liittymisehdot YLE2021. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/fingrid_yle2021.pdf. Viitattu 13.2.2025.
- Fingrid 2022. Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/uusi-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afr-tek-nisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvak-syttamisprosessi.pdf>. Viitattu 5.2.2025.
- Fingrid 2023a. Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-tek-nisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvak-syttamisprosessi.pdf>. Viitattu 30.1.2025.

Fingrid 2023b. Reservituotteet ja markkinapaikat. Julkinen esitysmateriaali. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>. Viitattu 15.1.2025.

Fingrid 2023c. Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismprosessi. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-2-taajuuden-vakautusreservien-fcr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakсыttamismprosessi.pdf>. Viitattu 30.1.2025.

Fingrid 2024a. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>. Viitattu 13.12.2024.

Fingrid 2024b. Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservitoimittajien-FFR-ehdot-ja-edellytykset.pdf>. Viitattu 17.1.2025.

Fingrid 2024c. Itsenäinen aggregointi. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/itsenainen-aggregointi/>. Viitattu 5.2.2025.

Fingrid 2024d. Kulutusjousto. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/>. Viitattu 13.2.2025.

Fingrid 2024e. Nopea taajuusreservi (FFR). Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>. Viitattu 13.12.2024.

Fingrid 2024f. Reserveistä ja reservimarkkinoista. Julkinen esitysmateriaali. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien-perusteet.pdf>. Viitattu 30.1.2025.

Fingrid 2024g. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>. Viitattu 13.12.2024.

Fingrid 2024h. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>. Viitattu 13.12.2024.

Fingrid 2025a. Ansaintamallit. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>. Viitattu 12.2.2025.

Fingrid 2025b. Markkinapaikat. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>. Viitattu 3.5.2025.

Fingrid 2025c. Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto -ohje. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fingridin-reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto--ohje.pdf>. Viitattu 30.4.2025.

Fingrid 2025d. Reservimarkkinat. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>. Viitattu 30.1.2025.

Fingrid 2025e. Reservituottolaskuri. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservituottolaskuri/>. Viitattu 14.3.2025.

Fingrid 2025f. Yleistietoa sähkömarkkinoista. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&pageSize=5&page=1&language=fi>. Viitattu 16.1.2025.

Granlund 2025a. Meistä – Granlund. Verkkajulkaisu. <https://www.granlund.fi/meista/>. Viitattu 31.3.2025.

Granlund 2025b. Miksi kulutusjousto on mahdollisuus myös kiinteistöille? Verkkajulkaisu. <https://www.granlund.fi/blogi/kulutusjousto-on-mahdollisuus-myos-kiinteistoille/>. Viitattu 31.3.2025.

- Granlund 2025c. Palvelut – Granlund. Verkkajulkaisu. <https://www.granlund.fi/palvelut/>. Viitattu 31.3.2025.
- Hafeez, A., Chika, O., Kingsley, N., Daramy, K. 2024. Improvement in battery technologies as panacea for renewable energy crisis. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06021-x>. Viitattu 28.2.2025
- Kakkonen, J. 2024. Reservimarkkinoilla toimiminen. Reservimarkkinakoulutus. Fingrid 2.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>. Viitattu 30.1.2025.
- Karvinen, T. 2025. Ryhmäpäällikkö. Granlund Oy. Haastattelu 2.4.2025.
- Korhonen, N. 2024. Markkinoille tulon vaiheet. Reservimarkkinakoulutus. Fingrid 2.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>. Viitattu 5.2.2025.
- Kuivaniemi, M. 2024. Reservien tarve kasvaa kohisten. Kantaverkkoyhtiön lehti 2024 (1), 10–11. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_1_2024.pdf. Viitattu 12.12.2024.
- Kujansuu, T. 2025. Energiavarastot reservimarkkinoilla. Sähkömarkkinatoimikunnan kokous 10.2.2025. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/markkinatoimikunta/smtk125_-smtk-2025-1-energiavarastot-reservimarkkinoilla.pdf. Viitattu 21.2.2025.
- Laki sähkömarkkinalain muuttamisesta 497/2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230497>, Viitattu 5.2.2025.
- Leinonen, P. 2018. Mitä on inertia? Kantaverkkoyhtiön lehti 2018 (2), 15. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fg0218_pdf.pdf. Viitattu 13.12.2024.
- Luojus M. 2022. Tutkimukselliset lähestymistavat -tutkimuksellinen kehittämistyö. PowerPoint-diat. Menetelmäopinnot ja tutkimusviestintä. Savonia-ammattikorkeakoulu 2.4.2025.
- Mattila, T. 2024. Reservit osana sähköjärjestelmää. Reservimarkkinakoulutus. Fingrid 2.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>. Viitattu 30.1.2025.
- Motiva Oy 2024. Selvitysraportti: Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa. https://www.motiva.fi/files/22949/Selvitysraportti_-_Sahkoistamalla_energiatehokkuutta_teollisuudessa.pdf. Viitattu 21.2.2025.
- Parat 2025. PARAT IEH Suurjännite-elektrodikattila höyrylle tai kuumalle vedelle. Verkkajulkaisu. <https://www.parat.no/fi/tuotteemme/industry/parat-ieh/>. Viitattu 3.3.2025.
- PKS 2024. Mitä on kulutusjousto? Verkkoinfra. <https://www.pks.fi/asiakaspalvelu/tietoa-sahkosta-ja-sahkomarkkinasta/mita-on-kulutusjousto>. Viitattu 13.2.2025.
- Rinne, O. 2024. Kapasiteettikorvaus ja energiamaksu. Reservimarkkinakoulutus. Fingrid 3.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>. Viitattu 13.2.2025.
- ST-käsikirja 42. Akkuenergiavarastot. Espoo: Sähkötieto ry.
- Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. Tampere: Tampereen Yliopisto-paino Oy – Juvenes Print. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100802/Toikko_Rantanen_Tutkimuksellinen_kehittamistoiminta.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu 3.4.2025.
- Välimäki, M. 2024. Palveluntuottajat helpottavat tietä reservimarkkinoille. Kantaverkkoyhtiön lehti 2024 (3), 26–27. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_lehti-3-2024.pdf. Viitattu 2.4.2025.

LIITE 1: SALASSA PIDETTÄVÄ