



SÄHKÖAKKUENERGIAVARASTOT SÄHKÖMARKKINOILLA

Tarpeet ja käytön optimointi

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Patrik Kähönen

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Patrik Kähönen

Sähköakkuenergiavarastot sähkömarkkinoilla: Tarpeet ja käytön optimointi

Energiatekniikka

2024

36 sivua, 6 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Avainsanat: sähköakkuenergiavarasto, sähkömarkkinat, optimointi, Fingrid

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan sähköakkuenergiavarastojen tarpeellisuutta ja niiden käytön kannattavuutta sekä optimointia sähkömarkkinoilla.

Työssä esitellään sähkömarkkinoiden rakenne painottuen reservimarkkinoihin. Lisäksi tehdään katsaus sähköakuteknologiaan ja akkujen markkinatilanteeseen. Tämän jälkeen työssä tutkitaan, minkälaisia ansaintamahdollisuuksia sähkömarkkinoilta löytyy sähköakkuenergiavaraston käytölle. Työ sisältää katsauksen sähköakkuenergiavarastojen kannattavuudesta löytyviin aineistoihin, joiden perusteella muodostetaan kuva tämänhetkisestä tilanteesta sähköakkuenergiavarasto investoinnin kannattavuudelle sähkömarkkinoilla. Lopuksi esitellään viimeaikaisia sähköakkuenergiavarastoprojekteja Suomesta ja maailmalta.

Työssä tehdyn markkinakatsauksen perusteella sähköakkuenergiavarastojen määrä on kasvussa. Tämän selittää uusiutuvien sääriippuvaisten energiantuotantomuotojen lisääntymisen myötä kasvava taajuudenhallinnan tarve, johon sähköakut soveltuvat loistavasti teknisiltä ominaisuuksiltaan. Aineistokatsauksen perusteella sähköakkuenergiavarasto ei muodostu kannattavaksi investoinniksi, jos sitä tarjotaan sähkömarkkinoille vain yksittäiselle markkinapaikalle, esimerkiksi taajuuden vakautukseen tai spot-markkina käyttöön. Sijoituksista muodostuu kannattava silloin, kun akkua tarjotaan samanaikaisesti usealle markkinapaikalle. Tällöin parhaimmat tuotot akulle saadaan FCR-N tuotteesta. Edellä mainittu useammalle markkinapaikalle tarjoaminen muodostaa monimutkaisen resurssienhallintakäytännön akun käytölle. Tämän haasteen ratkaisemiseksi löytyy optimointipalvelujen tuottajia, joista esitellään yksi työn loppupuolella. Sähköakkuenergiavarastojen käytön lisääntyessä erilaisten optimointipalveluiden tarve ja tarjonta kasvaa myös tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Patrik Kähönen

Battery energy storage systems in the electricity markets: Needs and the optimization of usage

2024

36 pages, 6 figures, 1 table

Examiners: Professor Esa Vakkilainen

Keywords: BESS, electricity market, optimization, Fingrid

This bachelor's thesis examines the need, profitability and optimization of battery energy storage use in the electricity markets.

The thesis examines the current structure of electricity markets with focus on the reserve markets. Additionally, it provides a review of battery technology and the current market situation for batteries. Following this, the thesis examines the earning opportunities of battery energy storages in the electricity markets. The thesis investigates material available about profitability of battery energy storage systems, from which we derive an understanding of the current profitability outlook of battery energy storage usage in the electricity market. Lastly, the thesis presents recent battery energy storage projects globally highlighting the ones located in Finland.

From the market review of the thesis, we see that the number of battery energy storage systems is increasing. This can be explained by the growing amount of weather dependent renewable energy sources which increase the need of frequency regulation of the grid for which the batteries are well suited due to their technical features. Based on the material found on the topic of profitability we find that battery energy storage systems do not form a profitable investment if offered to only one marketplace such as frequency stabilization or the spot market. Investments became profitable when multiple marketplaces were operated simultaneously. In this case the best profits were obtained from the FCR-N market. When operating battery energy storage systems for multiple marketplaces resource management becomes a complex issue. To address this challenge, there are companies that provide tools for optimization. Such company is presented at the end of this thesis.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

aFRR	automaattinen taajuudenhallintareservi (Automatic Frequency Restoration Reserve)
BESS	sähköakkuenergiavarasto (Battery Energy Storage Systems)
BTM	sijainti mittarin takana (Behind The Meter)
FCR-D	taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances)
FCR-N	taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal Operation)
FFR	nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve)
FTM	sijainti mittarin edessä (Front of The Meter)
mFRR	manuaalinen taajuudenhallintareservi (Manual Frequency Restoration Reserve)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Sähkömarkkinat.....	7
2.1	Sähkömarkkinoiden perusteet.....	7
2.2	Reservimarkkinat.....	8
2.3	Reservituotteet.....	9
2.3.1	Taajuuden vakautusreservit.....	9
2.3.2	Taajuuden palautusreservit.....	10
2.3.3	Korvaavat reservit.....	10
3	Sähköakat energiavarastoinnissa.....	12
3.1	Tekniset ominaisuudet.....	12
3.2	Markkinatilanne.....	13
4	Sähköakat sähkömarkkinoilla.....	16
4.1	Käyttötarkoitukset reservimarkkinoilla Suomessa.....	16
4.2	Spot-markkinat.....	17
4.3	Muut käyttökohteet Suomessa.....	18
4.4	Ansaintalogiikka.....	19
4.4.1	Laskentaesimerkkejä.....	20
5	Kannattavuus ja optimointi.....	23
5.1	Kannattavuus taajuuden vakautusmarkkinoilla.....	23
5.2	Kannattavuus spot-markkinoilla.....	25
5.3	BESS-optimointipalvelut.....	26
6	Sähköakuenergiavarastoprojektit Suomessa ja maailmalla.....	28
7	Johtopäätökset.....	30
	Lähteet.....	32

1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä perehdytään sähköakkuihin, tarkemmin ottaen niiden rooliin sekä tarpeisiin energianvarastoinnin työkaluna sähkömarkkinoilla eri markkinaosapuolten näkökulmasta nykyhetkessä sekä tulevaisuuden kuvassa. Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen sähkömarkkinoilla luo epävakautta sähkönhintoihin, esimerkiksi sääolosuhteiden vaihdellessa, lisäten tarvetta ja kiinnostusta vakauttavia työkaluja, kuten sähköakkuja kohtaan markkinaosapuolten keskuudessa. Lisääntynyt tarve ja kiinnostus vakauttavia työkaluja kohtaan tekee aiheesta relevantin ja kiinnostavan tutkimuskysymyksen tulevaisuuden muuttuvaa sähkömarkkinoita ajatellen. Kuitenkin samaan aikaan, kun tarve sähköakuille on kasvussa, tuottaa niiden integroiminen sähkömarkkinoille kysymyksen, kuinka ja mihin osaan markkinoita tulisi sähköakkuenergiavarastoja suunnata optimaalisen hyödyn saavuttamiseksi.

Työssä esitellään sähkömarkkinoiden rakenne sekä tutkitaan markkinoilla tällä hetkellä käytössä olevia tuotteita ja vaatimuksia. Tämän lisäksi työssä perehdytään sähköakkujen nykyiseen asemaan energianvarastointityökaluna sekä niiden integrointiin sähkömarkkinoilla toimiviin tuotteisiin. Tehdään katsaus optimointikysymyksestä löytyviin aineistoihin ja pyritään kyseisten aineistojen perusteella muodostamaan yhtenevä kuva nykytilanteesta ja tulevaisuuden näkymistä. Esitellään myös tämänhetkisiä sähköakku pohjaisia energianvarastoprojekteja niin globaalisti kuin Suomessa.

Kandidaatintyön aihe on saatu Lappeenrannan Energia Oy:ltä ja toteutettu yhteistyössä heidän kanssaan. Lappeenrannan Energia Oy on Lappeenrannan kaupungin omistama konserniyhtiö, jonka sähkönjakeluverkko kattaa Lappeenrannan lisäksi Lemmin, Savitaipaleen, sekä Taipalsaaren alueen. Sähkönsiirron lisäksi Lappeenrannan Energia Oy huolehtii vesihuollosta, sekä kaukolämmön jakelusta Lappeenrannan alueella. (Lappeenrannan Energia 2024a.)

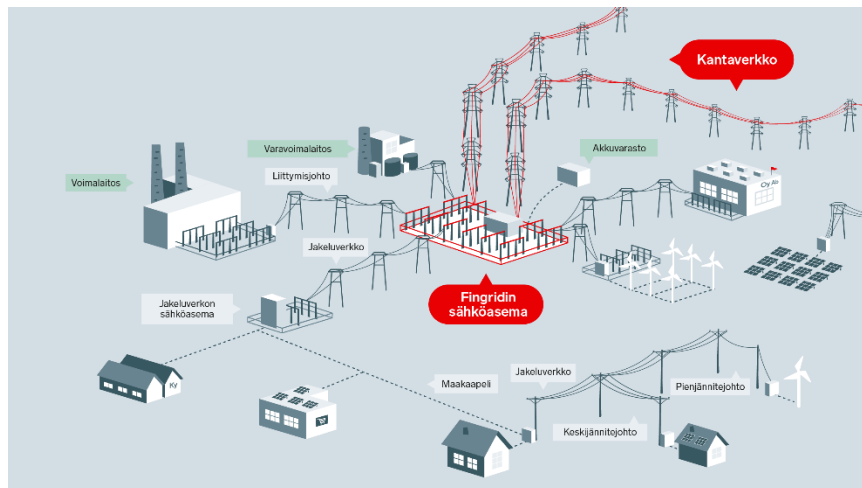
2 Sähkömarkkinat

Tässä kappaleessa esitellään ensin yleisesti sähkömarkkinoiden rakenteen perusteet, jonka jälkeen tehdään katsaus reservimarkkinoihin, ja kerrotaan reservimarkkinoilla esiintyvistä tuotteista.

2.1 Sähkömarkkinoiden perusteet

Sähkömarkkinoilla tarkoitetaan toimintaympäristöä, jossa sähkönmyyjät myyvät sähköä loppukäyttökohteisiin, joita Suomessa löytyy arviolta 3,5 miljoonaa (Energiavirasto 2023). Tarkemmin eriteltynä markkinoilla toimivat osapuolina sähkönkuluttajat, sähköntuottajat sekä sähköverkot. Sähköverkon teknisen toiminnallisuuden vuoksi sähkönkulutuksen ja tuotannon tulee olla joka hetki tasapainossa suhteessa toisiinsa. Tästä tasapainosta kertoo sähköverkon taajuus, jonka pitää olla 50 Hz kuitenkin niin, että esimerkiksi vian aiheuttaman taajuuspoikkeaman suuruus sähköjärjestelmässä saa olla enintään 0,5 Hz. (Fingrid 2024a.)

Sähkömarkkinoiden pääperiaate perustuu pitkälti edellä mainitun sähköverkon taajuuden perusteella kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseen, jota kutsutaan myös tasehallinnaksi. Tasehallinnan perusteella määräytyy sähkönhinta. Tästä esimerkkinä voidaan havaita Suomessa talviaikaan kulutushuippujen myötä hintojen nouseminen kulutuksen lisääntyessä. Hinnan säätelyn avulla pyritään tasaamaan kulutusta sähköverkon taajuuden säilyttämiseksi. Vastaavasti matalan kulutuksen aikaan sähkön tarjonnan ylittäessä kysynnän pyritään matalalla sähkön hinnalla lisäämään kulutusta. (Fingrid 2024b.)



Kuva 1. Kuinka sähkö kulkee. (Fingrid 2024c.)

Ylätasolla tästä ison kokonaisuuden toimivuudesta vastaa lakisääteisesti monopoli-asemassa Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid, joka on suomalaisten eläkeyhtiöiden sekä Suomen valtion omistuksessa. Kuten kuvassa 1 on esitetty, kantaverkko kattaa sähkönsiirron korkeajännitteisen runkoverkon, jonka avulla liitetään toisiinsa sähkön jakeluverkot, sähkönkuluttajat, sekä sähköntuottajat. (Fingrid 2024d.)

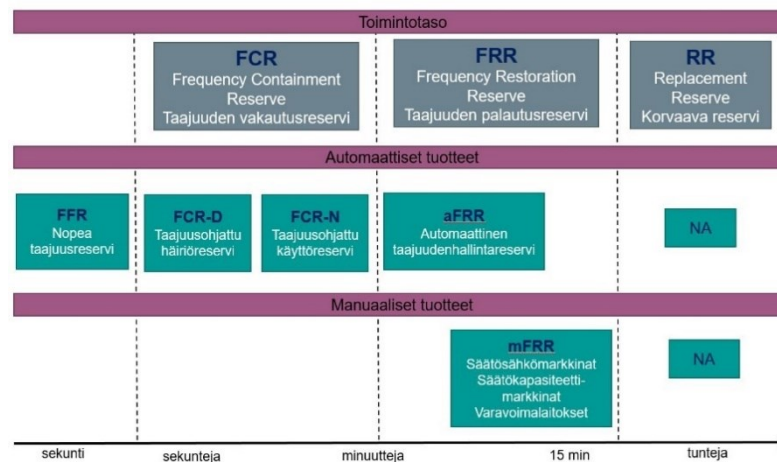
2.2 Reservimarkkinat

Sähkömarkkinoidenosapuolten vastuulla on suunnitella ennakkoon tuotannon ja kulutuksen tasapaino, mutta tämä tase ei voi tietenkään aina osua täysin kohdalleen ja poikkeamien hallitsemiseksi tarvitaan reservityökaluja taajuuden säätelyä varten. Fingrid hankkii reservejä ylläpitämiltään markkinoilta. Nämä reservit pitävät sisällään voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja. (Fingrid 2024a.)

Ajankohtaista näkökulmaa reservimarkkinoista puhuttaessa tuo säästä riippuvaisten energialähteiden integroiminen sähkömarkkinoille. Tuuli- ja aurinkovoimaa käytettäessä tuotannon vaihtelut lisääntyvät esimerkiksi muuttuvien sääolosuhteitten takia. Tämä lisää entisestään tarvetta vakauttaville työkaluille ja energianvarastoinnille.

2.3 Reservituotteet

Reservimarkkinoilla käytetään työkaluina kuvan 2 mukaisia tuotteita, joiden avulla ylläpidetään sähköverkon oikeaa taajuutta poikkeamissa ja mahdollisissa häiriötilanteissa. Tässä kappaleessa ylössäädöstä puhuttaessa tarkoitetaan tilannetta, jossa sähköntuotanto on pienempää kuin sähkönkulutus. Tällöin reagoidaan esimerkiksi nostamalla voimalaitoksen sähköntuotantoa tai karsimalla sähkönkulutusta. Vastaavasti alassäädöstä puhuttaessa tarkoitetaan tilannetta, jossa tuotantoa on liikaa suhteessa kulutukseen. Tällöin reagoidaan päinvastaisesti ajamalla tuotantoa alas tai kasvattamalla kulutusta. (Fingrid 2024e.)



Kuva 2. Reservilajit reservimarkkinoilla (Fingrid 2024e.)

Kuvassa 2 reservilajit ovat esiteltyinä jaoteltuna toimintatasojen perusteella. Lisäksi jako tehdään automaattisiin sekä manuaalisiin tuotteisiin. Kuvan alalaidassa janalla kulkeva aika havainnoi tuotteiden aktivointiaikaa. Aktivointiajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu käskystä aktivoida reservi siihen, kun reservi on toiminnassa ja toimittaa halutun tehon verkkoon. (Fingrid 2024e.)

2.3.1 Taajuuden vakautusreservit

Taajuuden vakautusreservejä käytetään nimensä mukaisesti sähköverkon taajuuden jatkuvaan hallintaan. Taajuuden vakautusreserveihin kuuluvia tuotteita ovat taajuusohjattu

käyttöreservi FCR-N (engl. Frequency Containment Reserve for Normal Operation), jonka tehtävä on pitää verkon taajuus välillä 49,9 Hz–50,1 Hz ja kyettävä niin ylös- kuin alassäätöön. Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D (engl. Frequency Containment Reserve for Disturbances), jonka tehtävä on pitää verkon taajuus välillä 49,5–50,5 Hz. FCR-D jakautuu erikseen ylös- ja alassäätötuotteisiin. Edellä mainitut vakautusreservituotteet kykenevät taajuuden säätöön sekunti- ja minuuttitasolla. Edellä mainittujen lisäksi taajuuden vakautusreserveihin kuuluu nopea taajuusreservi FFR (engl. Fast Frequency Reserve), jota käytetään pienen inertian tapauksissa taajuuden hallintaan vakautusreservien tukena. Nimensä mukaisesti FFR kykenee nopeaan säätelyyn, esimerkiksi tilanteessa, jossa taajuus on 49,5 Hz FFR:n aktivointiaika on 0,7 sekuntia. (Fingrid 2024f; Fingrid 2024g.)

2.3.2 Taajuuden palautusreservit

Taajuuden palautusreservien avulla palautetaan taajuus normaalille toiminta-alueelle eli 49,1 Hz - 50,1 Hz ja vapautetaan taajuuden heilahtelusta aktivoituneet vakautusreservit takaisin käyttöön. Tälle toimintatasolle kuuluvia tuotteita ovat automaattinen taajuudenhallintareservi aFRR (engl. automatic Frequency Restoration Reserve) ja toisena tuotteena manuaalinen taajuudenhallintareservi mFRR (engl. manual Frequency Restoration Reserve). Molempien tuotteiden toimintatarkoitus on palauttaa verkon taajuus nimellistaajuuteen, sekä taajuudensäätöalueen tehotasapaino sille suunniteltuun arvoon. Erona näillä kahdella on se, että aFRR reagoi nimensä mukaisesti automaattisesti kantaverkkoyhtiön 10 sekunnin välein lähettämän tehonmuutossignaalin pohjalta. mFRR puolestaan vaatii manuaalista reagointia markkinaosapuolilta, eli esimerkiksi taajuuden laskiessa varavoimalaitoksen käynnistämistä, täten ollen hitaampi reagoimaan taajuuden heittelyihin kuin aFRR. (Fingrid 2024h; Fingrid 2024i.)

2.3.3 Korvaavat reservit

Korvaavat reservit palauttavat häiriötilanteessa aktivoituneet taajuuden palautusreservit takaisin valmiuteen. Tällä valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeen mahdollisesti ilmeneviin vikatilanteisiin. Korvaavia reservejä ei ole tällä hetkellä käytössä pohjoismaisessa

sähköjärjestelmässä. (Korhonen 2024.) Näin ollen korvaat reservit eivät ole tämän työn kannalta oleellisia eikä niiden toimintaan ja tuotteisiin perehdytä tarkemmin.

3 Sähköakut energiavarastoinnissa

Uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääntymisen myötä energiantuotannon ennustettavuus laske, joka puolestaan kasvattaa tarvetta energianvarastointiratkaisujen käytölle sähköverkon epätasapainon hallitsemiseksi. Yksi oleellisista energianvarastointikeinoista tähän tarkoitukseen on teollisen mittakaavan sähköakut. Sähköakkujen tekniikan ja tuotannon kehittyessä niiden hintoja saadaan laskettua ja näin ollen niiden kannattavuus kasvaa. (Eesi 2019.)

Tässä kappaleessa luodaan pintapuolinen katsaus sähköakkujen teknisiin ominaisuuksiin ja vaatimuksiin. Tämän lisäksi tutustutaan sähköakkujen nykyiseen markkinatilanteeseen eri markkinasegmenteillä sekä Suomessa että globaalisti.

3.1 Tekniset ominaisuudet

Energiavarastoinnissa käytettävät teollisen mittakaavan akut ovat yleisimmin litiumioniakkujen eri variaatioita niiden kattaessa 90 % akkuvarastoratkaisuista maailmanlaajuisesti (EESI 2019). Muita mahdollisia ratkaisuja samaan toimintatarkoitukseen ovat esimerkiksi lyijyhappoakut ja natrium-rikkiakut, mutta niihin ei tämän työn rajallisuuden puitteissa perehdytä syvällisemmin. Litiumioniakkujen rakenteeseen kuuluu tyypillisesti positiivisesti varautunut alumiinipohjainen katodi, negatiivisesti varautunut kuparipohjainen anodi, joka sisältää hiili- tai grafiittikerroksen, erotin sekä elektrolyytti, joka on tyypillisesti litiumsuolaa orgaanisessa liuottimessa. (Targray 2011.)

Akkuenergiavarastoratkaisua pohdittaessa oleellinen huomioon otettava parametri on akun energiatiheys. Korkeamman energiatiheuden omaavilla akuilla saavutetaan parempi akun käyttöaika suhteessa sen kokoon. Yleisesti eri litiumioniakku tyyppien energiatiheys liikkuu välillä 50–260 Wh/kg. Yksi yleisimpiä tuotantolaitosten yhteydessä käytettyjä litiumioniakku tyyppiä on litium-rautafosfaattiakku. Litium-rautafosfaattiakkujen energiatiheys on välillä 90–160 Wh/kg. Tästä voidaan huomata markkinoilta löytyvän myös korkeamman energiatiheuden ratkaisuja. Litium-rautafosfaattiakkujen suosio teollisessa mittakaavassa perustuu osittain siihen, että ne ovat toiminnallisuudeltaan luotettavia ja ideaalisia teollisten

käyttötarkoitusten tuomiin vaatimuksiin, kuten vaihteleviin lämpötiloihin. Lisäksi kyseisillä akkutyypeillä on korkea paloturvallisuus verrattuna muihin mahdollisiin akkuratkaisuihin. (FLUX 2020.) Tärkeä toiminta-arvo sähköakkujen osalta on myös niiden kuormitusjaksojen määrä, eli kuinka monta kertaa tyhjän akun voi ladata täyteen ja käyttää uudelleen tyhjäksi. Litiumrautafoosfaattiakkujen käyttöikä kuormitusjaksoina laskettuna on tyypillisesti välillä 2000–10 000 sykliä, joidenkin toimijoiden luvatta jopa 20 000 sykliä, riippuen muuttujista, kuten lämpötila, latausvirta ja purkaantumissyvyys. (Eco Tree Lithium 2023.) Purkaantumissyvyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka suuri osa ampeeritunteina akun maksimikapasiteetista puretaan tai ladataan käyttökerralla. Litiumsähköakkujen osalta tulee optimaalisen käyttöikänsä saavuttamiseksi purkaantumissyvyyttä pitää välillä 20–80 %. Latauksentason säätelyn tulee myös olla hallinnassa akun kestävyuden parantamiseksi. Käyttötarkoituksesta riippuen halutaan akun latausentaso pitää joko noin 80 prosentissa tai täydessä 100 prosentissa. Käyttökohteen vaatiessa vain satunnaista käyttöä tasaisissa olosuhteissa voidaan akku ladata aina täyteen, jos taas akulta vaaditaan jatkuvaa käyttöä, esimerkiksi epävakaisissa verkko-olosuhteissa, tulisi akku ladata aina noin 80 prosenttiin käyttöikänsä pidentämiseksi. (PEBBLEX 2023.)

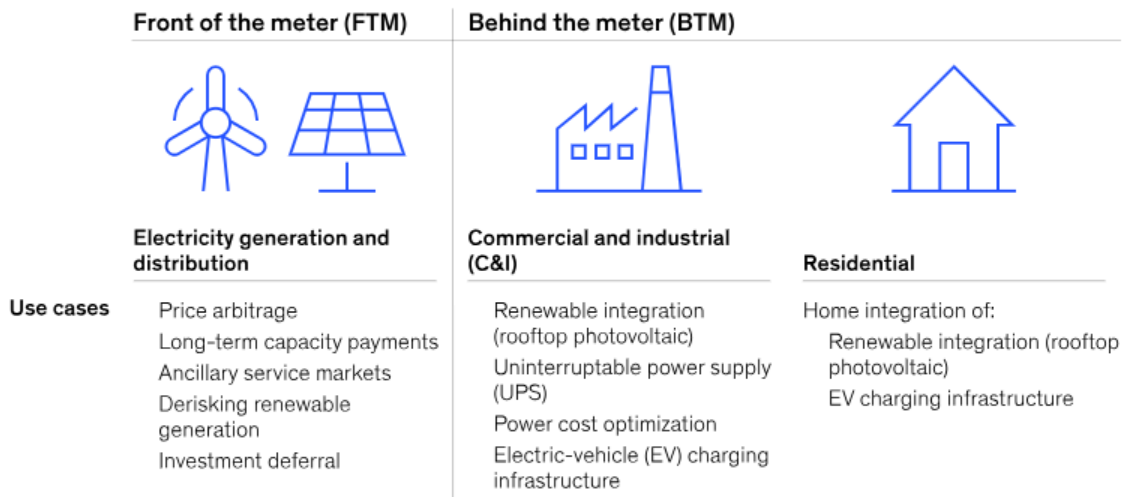
Itse sähköakun lisäksi sähköakkuenergiavaraston rakentamiseksi tarvitaan muitakin komponentteja, kuten verkkoinvertteri, jolla verkosta tuleva vaihtosähkö saadaan muunnettua akustolle sopivaksi tasasähköksi ja päinvastoin (EnergiaEki 2024). Riippuen akkuvaraston sijoituspaikasta ja käyttötarkoituksesta voidaan lisäksi jo olemassa olevaa tuotantolaitoksen infrastruktuuria ja muuntajia hyödyntää akkuvaraston integroimisessa osaksi sähköverkkoa.

3.2 Markkinatilanne

Globaalisti tarkasteltuna kokonaisuudessaan akkumarkkinoiden koko oli vuonna 2021 noin 112 miljardia Yhdysvaltain dollaria. Kasvuarvioissa ennustetaan akkumarkkinoiden arvon nelinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. Tuolloin markkinoiden arvoksi muodostuisi noin 424 miljardia Yhdysvaltain dollaria. (Statista 2024.) Vastaavasti Suomessa akkumarkkinoiden arvo oli vuonna 2022 noin 90,63 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria. Markkina-arvon ennustetaan saavuttavan 509,64 miljoonan Yhdysvaltain dollarin arvo vuoteen 2030 (Nextmsc 2024). Kyseisissä markkina-arvioissa tarkastelun kohteena ovat sähköakkumarkkinat kokonaisuudessaan eli sisältäen sovellutukset kuluttajatasolta esimerkiksi sähköautoista tai

matkapuhelimien akuista aina tämän työn puitteissa mainittuihin oleellisiin teollisiin käyttö-tarkoituksiin asti.

Battery energy storage systems are used across the entire energy landscape.



Source: McKinsey Energy Storage Insights

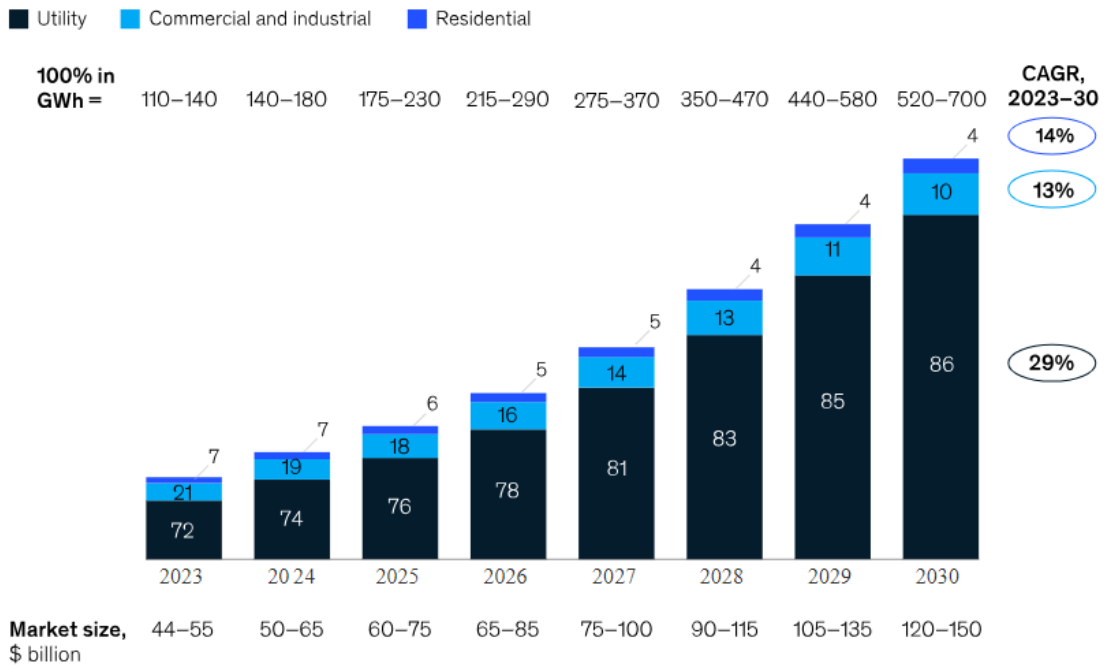
McKinsey & Company

Kuva 3. Sähköakkuihin perustuvan energiavarastoinnin markkinasegmentit (McKinsey & Company 2023.)

Sähköakkumarkkinoiden kokonaisuuden rajaamiseksi tämän työn osalta relevanttiin tarkuuteen, lähdetään tutkimaan nimenomaan BESS- tuotteiden (engl. Battery Energy Storage Systems) osuutta markkinoista. BESS-tuotteiden käyttötarkoitusten kokonaisuuden hahmottamiseksi jaetaan niistä muodostuva markkinaosuus kahteen segmenttiin kuvan 3 mukaisesti. Segmentit ovat FTM (engl. Front of The Meter) sekä BTM (engl. Behind The Meter). FTM tarkoittaa energiamarkkinoilla tapahtuvaa liikehdintää, joka toteutuu verkkoyhtiöiden puolella, eli sovellutuksia, jotka liittyvät lähinnä energian luontiin ja siirtoon ja joiden suuruus on kokoluokkaa 10 megawattituntia ja ylöspäin. BTM puolestaan viittaa joko kaupallisen tai teollisen toimijan hyödyntämiin sovellutuksiin, joissa kokoluokkaa liikkuu välillä 30 kilowattituntia-10 megawattituntia. Lisäksi BTM-segmenttiin kuuluvat kuluttajan puolella tapahtuvat toiminnot, esimerkiksi energianvarastointi omaan käyttöön, näiden käyttötarkoitusten kokoluokan ollessa alle 30 kWh. (SSE Energy Solutions 2023.)

Battery energy storage system capacity is likely to quintuple between now and 2030.

Annual added battery energy storage system (BESS) capacity, %



Note: Figures may not sum to 100%, because of rounding.
Source: McKinsey Energy Storage Insights BESS market model

McKinsey & Company

Kuva 4. Energianvarastointiin tarkoitettujen sähköakkujen segmenttien mukainen markkinaosuus jakauma (McKinsey & Company 2023.)

Kuvasta 4 voidaan huomata, että teollisen mittakaavan energianvarastointikapasiteetti vie reilusti suurimman osan BESS-tuotteiden markkinaosuudesta, ja on myös samalla eniten kehittyvä segmentti. Kyseinen kuva myös havainnollistaa BESS-ratkaisujen lähitulevaisuuden markkinakehitystä ennustaen kyseisten ratkaisujen kapasiteetin nelinkertaistumisen vuoteen 2030.

4 Sähköakut sähkömarkkinoilla

Tässä kappaleessa yhdistetään aiemmin työssä esiteltyt peruseriaatteet sähkömarkkinoiden rakenteesta sekä sähköakuista, ja näin ollen perehdytään sähköakkupohjaisten energiavarastointiratkaisujen tarjoamiin mahdollisuuksiin sähkömarkkinoilla. Lisäksi havainnollistetaan eri reservituotteiden ansaintamahdollisuuksia markkinoilla yksinkertaisten laskuesimerkkien avulla.

Suomessa tarve sähköakkuenergiavarastointiratkaisulle on globaalisti vertailtuna korkea johtuen hallituksen asettamista ilmastotavoitteista. Hallitus on muun muassa sitoutunut olemaan hiilivapaa vuoteen 2035 mennessä. Vihreään siirtymään liittyvät tavoitteet ovatkin luoneet Suomeen sähköakkuenergiavarastoprojekteilte suotuisan toimintaympäristön lisäten kyseisten projektien kysyntää ja tarvetta. Esimerkkitoimenpiteenä investointien vauhdittamiseksi uusiutuvan energian sektorilla myönnetään ilmastotavoitteita tukeviin projekteihin kokon projektin arvosta 20 % verovähennyksiä 150 miljoonaan euroon asti. (Valtioneuvosto 2024.) Tällä hetkellä Suomesta löytyy sähköakkuenergiavarastoratkaisuja hieman alle 100 megawatin tehon edestä. Viiden vuoden sisällä ilmoitettujen projektien toteutuessa tulee määrä nousemaan 359 megawattiin teollisten sähköakkuenergiavarastoratkaisujen osalta. (Elinkeinoelämän keskusliitto 2024.)

4.1 Käyttötarkoitukset reservimarkkinoilla Suomessa

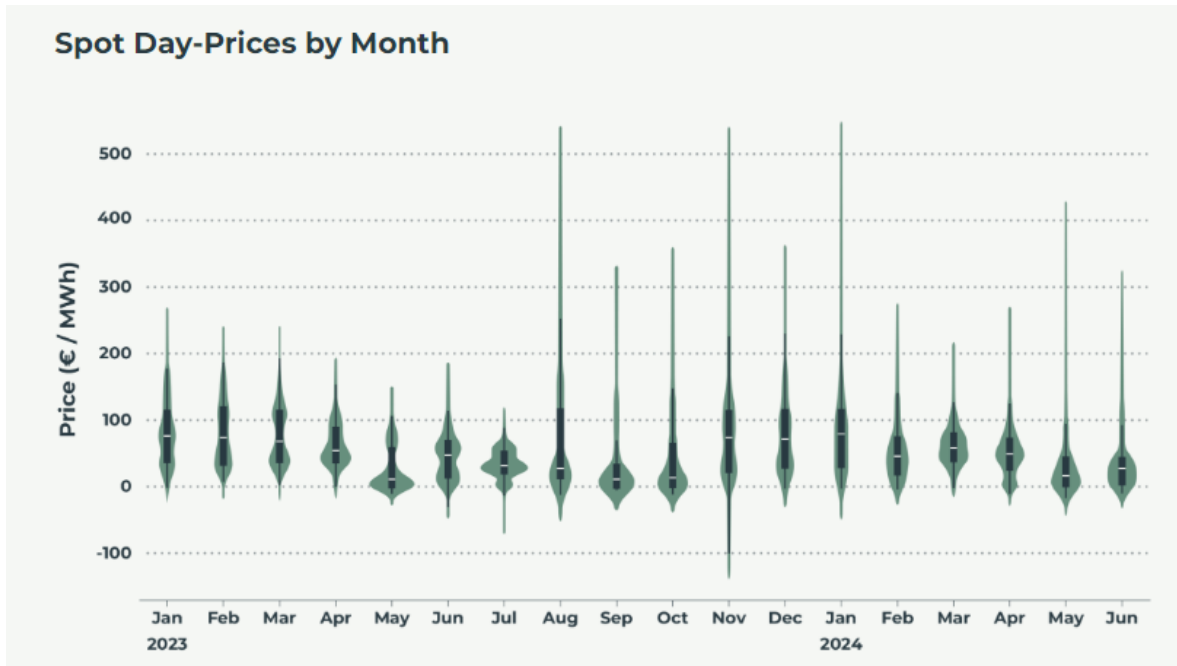
Osallistuakseen reservimarkkinoille, tulee reservinmyyjän sekä reservikohteen toteuttaa Fingridin asettamat ehdot. Lisäksi reservinmyyjän tulee tehdä sopimus liittymisestä reservimarkkinoille Fingridin kanssa. Reservinmyyjän tulee joko omistaa kohde, toimia kohteen sähkönmyyjänä tai tasevastaavana. Edellä mainittuja toimijoita kutsutaan avoimen toimitusketjun osapuoliksi. Reservikohteen tulee sijaita Suomessa tai olla integroitavissa suoraan kantaverkkoon. (Fingrid 2024j.)

Suurimman käyttövoiman reservimarkkinoille on Suomessa tarjonnut tähän mennessä vesivoima. Aurinko- ja tuulienergian osuuden kasvu energiantuotannossa kuitenkin aiheuttaa taajuudensäätelyn tarpeen lisääntymistä johtaen siihen, että vesivoiman aktivointinopeus ei

enää ole kantaverkon taajuuden säätelyyn optimaalinen, koska sen aktivointi on hitaampaa sähköakkuihin verrattuna. Sähköakkuja hyödyntävien energiavarastojen ominaisuuksiin kuulussa nopea aktivointiaika, hyvät säätömahdollisuudet, sekä korkeat hyötysuhteet, istuvat ne ominaisuuksiltaan oivasti reservikäytön vaatimaan lyhyiden aikavälien tehontarpeeseen. Tällä hetkellä suurin käyttö sähköakkuenergiavarastoille löytyy reservimarkkinoiden aiemmin mainituista taajuuden säätöreserveistä, joissa sähköakkujen toimintatarkoitus on säätää purku- ja lataustehoaan kantaverkon tilannekohtaisen taajuuden perusteella. Huomionarvoista on, että akkuteknologialla on kuitenkin vielä rajoittunut energiakapasiteetti sekä kallis hinta. Lisäksi on vielä kyseenalaista kykenevätkö akut nykyisellä hintatasollaan kompensoidaan uusiutuvien energianlähteiden kasvavaa reservitarvetta. Esimerkkitapauksena Oulujoen vesivoimalaitoksen teho pystytään korvaamaan noin 200 kappaleella 2 megawatin akkuja, mutta jos haluttaisiin kompensoida turbiinien läpi virtaavan veden tuottama energia sekä kyseisen voimalaitoksen sähköntuotanto, tällöin vastaavia akkuja tarvittaisiin 500 000 kappaletta. Kuten edellä esitetyn esimerkin akkujen tarpeen määrästä voidaan havaita, vesivoima osoittaa edelleen kyvykkyytensä ympäristöystävällisenä energian varastointi mahdollisuutena. (Fortum 2018.)

4.2 Spot-markkinat

Reservimarkkinoiden lisäksi toinen suuri käyttöpotentiaali sähköakkuvarastoille löytyy spot-markkinoilta, eli toisin sanoen sähköpörssissä, jossa käydään kauppaa tarjonta- ja ostajaosapuolien välillä. Tarjontapuolella toimivat voimalaitoksia omistavat sähköntuottajat, ostajapuolella puolestaan teollisuuslaitokset, jotka ostavat käyttöön tarvitsemansa sähkön suoraan pörssistä. Lisäksi ostajapuolelle kuuluvat sähkön vähittäismyyjät. Hinta seuraavan päivän sähkölle muodostuu näiden osapuolien välisen kysynnän ja tarjonnan perusteella. Sähköakat mahdollistavat tässä kokonaisuudessa sähköntuottajille suojautumisen alhaisilta markkinahinnoilta. Tilanteessa, jossa tuotantoa olisi runsaasti saatavilla, esimerkiksi tuuli-voimasta tuulisina päivinä, voidaan akkuja ladata. Toisaalta hetkinä, kun tuotanto on vähäistä, eli sähkönhintaa korkealla, akkuja puretaan. Tämä kuvio vakauttaa spot-hintoja ja luo liiketoiminnan näkökulmasta vakaata pohjaa, mahdollistaen sen, että sähkönhintaa ei pysytele useampaa päivää nollan tuntumassa. Ostajapuolen näkökulmasta edellä mainittu skenaario vähentää pörssisähkön ilmaisia tunteja, kun tuottajien ei tarvitse välittää tuotettua sähköä välittömästi markkinoille. (Vattenfall 2024.)



Kuva 5. Sovite Spot-hintojen vaihteluille kuukausittain (Capalo AI 2024.)

Kuten kuvasta 5 on havaittavissa spot-markkinahinnat ovat vaihdelleet paljon Suomessa viime aikoina. Vuosina 2023 ja 2024 Suomessa oli eniten negatiivisia hintatunteja Euroopassa. Syitä tähän olivat esimerkiksi uusiutuvan energian lisääntyminen sekä Olkiluoto 3:sen käyttöönotto 2023 sekä sen paluu vuosihuollosta 2024. Matalimpien hintojen lisäksi Suomessa on viime vuosina ollut myös kalleimpia Euroopassa nähtyjä spot-hintoja. Korkeiden hintojen syiksi voidaan mainita yllättävä pudotus ydinvoiman tuotannossa sekä Olkiluoto 3:sen huoltotyöt, jotka venyivät kaksi kertaa odotettua pidemmiksi. (Capalo AI 2024.)

4.3 Muut käyttökohteet Suomessa

Sähköakkuja pystytään lisäksi hyödyntämään ja integroimaan esimerkiksi kuormansiirrossa ja huippukuorman leikkaustarkoituksissa. Kuormansiirrolla tarkoitetaan tilannetta, jossa sähköakkuja ladataan halvan sähkön aikana ja latausta puretaan omaan käyttöön sähkön hinnan ollessa korkealla. Huippukuorman leikkauksessa suuren kulutuskohteen, kuten esimerkiksi sähkökattilan huippukulutuksen aikaan saadaan madallettua energiakustannuksia hyödyntämällä akustoa. Lisäksi akkuja voidaan käyttää uusiutuvan energian tuotannon yhteydessä vaikuttamaan siihen, halutaanko verkkoon syöttää enemmän vai vähemmän tuotantoa

suhteessa voimalaitoksen sen hetkiseen tehoon. (Sweco 2023.) Tässä kappaleessa esitellyissä käyttökohteissa hallinnoidaan suoraan omia kustannuksia hyödyntämällä sähköäkkua omiin tarpeisiin sen sijaan, että tarjottaisiin sitä suoraan markkinapaikoille

4.4 Ansaintalogiikka

Fingrid maksaa reservikohteille ylläpitokorvauksia etukäteen määritetyn vuosimarkkinahinnan mukaan. Vuosimarkkinahinnat kuluvalle vuodelle muodostuvat aina edellisen vuoden syksynä käydyin tarjouskilpailun perusteella. Tarjouskilpailun lopputuloksena määritetään toimijakohtainen vuosimarkkinahinta sekä vuosisopimusmäärä. Taulukossa 1 esitellään vuosille 2023 ja 2024 toteutuneet taajuuden käyttö- ja häiriöreservien vuosihinnat. (Fingrid 2023; Fingrid 2024k.) Taulukosta voidaan havaita, että vuosien 2023 ja 2024 välillä merkittävin muutos on tapahtunut taajuusohjatun häiriöreservin alassäätötuotteen määrässä, joka on kasvanut 58,8 megawattia. FCR-D alas on melko uusi tuote, mikä vaikuttanee sen määrän viimeaikaiseen kasvuun. Lisäksi hankintamäärän lisääntymistä tapahtuu tällä sektorilla, koska Fingrid arvioi kokonaishankintamäärän kasvavan myös jatkossa, johtuen muuttuvasta markkinatilanteesta ja kasvavasta reservien tarpeesta. (Fingrid 2024l.)

Taulukko 1. Taajuuden vakautusreservien vuosimarkkinahinnat, ja määrät

Vuosi	Tuote	Hinta (€/MWh)	Määrä (MW)
2023	FCR-N	19,10	67,7
2023	FCR-D,ylös	2,81	345,1
2023	FCR-D,alas	9,99	186,4
2024	FCR-N	25,39	67,5
2024	FCR-D,ylös	4,00	347,8
2024	FCR.D,alas	9,50	245,2

Vuosimarkkinoiden lisäksi markkinaosapuolilla löytyy ansaintamahdollisuuksia Fingridin ylläpitämiltä tuntimarkkinoilta. Tuntimarkkinoille osallistuminen on mahdollista milloin tahansa. Osallistuminen toimii siten, että reservintoimittaja jättää tarjouksen pyytämästään hinnasta ja määrästä tarjoamalleen reserville edellispäivänä kello 18:30 mennessä. Fingrid ostaa kantaverkkoonsa tarvitsemansa määrän reserviä jokaiselle tunnille. Hinta määräytyy

tuntikohtaisesti kalleimman käytetyn tarjouksen perusteella. Huomioitavaa on, että vuosimarkkinatasolle ilmoitettua reserviä ei saa tarjota tuntimarkkinoille. Kuvassa 6 on esitelty vuosi- ja tuntimarkkinoiden peruseriaatteiden eroavaisuudet.

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 klo 18.00 mennessä.	Tarjoukset seuraavan vuorokauden tunneille jätettävä klo 18.30 mennessä.
Reservitoimittajalla on velvollisuus ylläpitää vuosimarkkinoille myymäänsä reserviä vapaan kapasiteetinsa 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 hyväksytyyn tarjouksen mukaan.	Maksettava korvaus määräytyy kullekin tunnille erikseen kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan.

Kuva 6. Vuosi- ja tuntimarkkinoiden ominaisuudet. (Fingrid 2024f.)

Tunti- ja vuosimarkkinoilla on molemmilla samat tekniset vaatimukset sekä molemmilla markkinoilla tuotteisiin kuuluu taajuusohjattu käyttöreservi, taajuusohjattu häiriöreservi ylös ja taajuusohjattu häiriöreservi alas.

4.4.1 Laskentaesimerkkejä

Reservimarkkinoille osallistumisen vuosituottoa voi hahmotella yksinkertaisella mallilla, jossa tuotto määräytyy kauppojen mukaan hyväksytyyn reservikapasiteetin määrän, vuosimarkkinahinnan sekä käyttöajan eli toisin sanoen pysyvyyden perusteella. Pysyvyyden arvo vaihtelee vuodessa välillä 0–8760 tuntia riippuen kyseisen reservituotteen

hankintatunneista ja saatavuudesta. Tässä kappaleessa esiintyvät kaavat perustuvat Fingridin esimerkkeihin. (Fingrid 2024l.)

$$\text{tuotto (€)} = \text{hyväksytty reservikapasiteetti (MW)} * \text{hintaa} \left(\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) * \text{pysyvyys (h)} \quad (1)$$

Seuraavaksi esitetään yksinkertaistettuja esimerkkejä reservimarkkinoille osallistumisen hankintamalleista eri tuotteilla. Todellisissa skenaarioissa tulisi tarkastella erikseen tapauskohtaisesti hinnoitteluperiaatteita sekä ehtoja markkinapaikkakohtaisia sopimuksista.

Oletetaan 1 MW taajuusohjattu käyttöreserviä, jolle valitaan taulukko 1. mukaisesti vuoden 2024 markkinahinta ja pysyvyudeksi 7000 h.

$$1 \text{ MW} * 25,39 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 7000\text{h} = 177\,730 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} \quad (2)$$

Oletetaan 1 MW taajuusohjattua häiriöreserviä (ylössäätö), jolle valitaan taulukko 1. mukaisesti vuoden 2024 markkinahinta ja pysyvyudeksi 7000 h.

$$1 \text{ MW} * 4 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 7000\text{h} = 28\,000 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} \quad (3)$$

Kohteet, jotka kykenevät säätöön 15 minuutin aktivointiajalla, voivat osallistua säätösähkömarkkinoille, joille jätetään tunneittain alassäätö- ja ylössäätötarjouksia. Korvaus tästä määräytyy kalleimman hyväksytyyn tarjouksen perusteella. Oletetaan, että on saatu 10 megawatin ylössäätö tarjous, ja käytetään Fingridin avointa dataa kuluneen vuoden 2024 säätösähkön ylössäädön keskihinnalle, jolle saadaan arvoksi 69,66 €/MWh (Fingrid 2024m). Valitaan pysyvyudeksi eli määräksi tunteja, jolloin tarjous on hyväksytty 5 % vuoden tunneista eli 438 tuntia.

$$10 \text{ MW} * 69,66 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 438 \text{ h} = 305\,110,8 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} \quad (4)$$

Kohteella, joka toimi säätösähkömarkkinoilla, on myös mahdollisuus osallistua säätökapasiteettimarkkinoille. Säätökapasiteettimarkkinoilla osallistuminen toteutuu tarjouskilpailun pohjalta. Kohteen tulee jättää sitovat ylös- ja alassäätötarjoukset. Kapasiteetti hankitaan päivää aikaisemmin tuntikohtaisesti. Korvaus määräytyy tuntikohtaisesti kalleimman hyväksytyt tarjouksen perusteella. Oletetaan 10 megawatin kapasiteettitarjous vuorokauden ajan hintaan 8 €/MWh.

$$10 \text{ MW} * 8 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 24 \text{ h} = 1920 \frac{\text{€}}{\text{vuorokausi}} \quad (5)$$

5 Kannattavuus ja optimointi

Sähkömarkkinan monimuotoisuus luo markkinaosapuolille positiivisen haasteen siitä, kuinka sähköakkuja tulisi tarjota markkinalle niistä saatavan hyödyn optimoimiseksi (McKinsey & Company 2023). Edellä mainitusta haasteesta muodostuu tutkimuskysymys, jota lähdetään seuraavaksi tarkastelemaan.

Akkuenergiavarastojen kannattavuudesta on jo tuotettu jonkin verran ajankohtaista tutkimustietoa diplomitöiden, tutkimushankkeiden sekä erilaisten toimeksiantojen osalta. Tässä kappaleessa perehdytään aiheesta tuotettuun tutkimusmateriaaliin, pohditaan ja vertaillaan niiden tuloksia, sekä arvioidaan niiden merkitystä tämän kappaleen tutkimuskysymyksen kannalta. Sähköakkuenergiavarastojen käytön optimoimiseksi on jo olemassa toimijoita, jotka suoraan tarjoavat optimointipalveluita sähköakkuenergiavarastojen toimintaan. Tällaiseen toimijaan tutustutaan myöhemmin yhdessä alakappaleessa.

5.1 Kannattavuus taajuuden vakautusmarkkinoilla

Akkuenergiavaraston kannattavuudesta taajuuden vakautusreservien markkinalla akuston ylläpitäjän näkökulmasta on tuotettu lähiaikoina tutkimustietoa ja katsauksia aiheeseen, mikä viestii kysymyksen kiinnostavuudesta ja jatkotutkimuksien tarpeesta (Tossavainen 2023; Tikka et al. 2018).

Tossavaisen (2023) tuottamassa työssä on tutkittu akkuenergiavaraston kannattavuutta taajuuden vakautusreservien markkinalla akuston ylläpitäjän näkökulmasta. Kyseisessä työssä akkuenergiavaraston toimintaa on mallinnettu Fingridiltä saadun taajuudenhistoriadataan perusteella, jonka avulla on toteutettu malli sähköakun varauksen hallinnan tarpeelle. Kannattavuuslaskelmien suorittamisessa on hyödynnetty muita aiheeseen liittyviä tutkimuksia sekä itse kyseisessä työssä tuotettua simulaatiodataa. Huomionarvoista on, että kyseisen työn kannattavuuslaskelmat on suoritettu tehden oletus siitä, että akkuenergiavarasto kohdennetaan aina vain yhdelle markkinapaikalle.

Yhtenä työn keskeisenä löydöksenä nousee esiin FCR-N tuotteen päivittyneet tekniset uudistukset koskien sen aktivointikykyä. Uudistuksien myötä FCR-N:n aktivointikyky tulee

nostaa aiemmasta 30 minuutista 60 minuutin tarkoittaen sitä, että reservikohteen tulee pystyä ylös- ja alassäätöön tunnin ajan entisen 30 min sijasta. Investoinnin näkökulmasta muutos on negatiivinen, sillä tämä luo käytännössä vaatimuksen akkuvaraston energiamäärän tuplaamiseen aktivointikykyvaatimuksen ajan tuplaantuessa. Samanaikaisesti Fingridin toivossa markkinoille lisää toimijoita, kilpailun ja hintakehityksen loiventamiseksi, on vaatimus FCR-N uudistuksesta hieman ristiriitainen.

Lopputuloksena työssä todetaan, että akkuenergiavarastolla ei muodostu kannattavaa investointia taajuusohjatun vakautusreservien markkinapaikoille. Lisäksi investoinnista ei saada takaisinmaksua pitoajan sisällä. Ainoa poikkeus tässä syntyi taajuusohjatun tuntimarkkinoiden alassäädössä, mutta siinäkin takaisinmaksu tapahtui vain hädin tuskin pitoajan puitteissa.

Vastaavaa kysymystä on tutkittu myös (Tikka et al. 2018) toimesta Lappeenrannassa tuotetussa tutkimusraportissa “Final report: Multi-objective role of battery energy storages in an energy system”. Kyseisessä raportissa Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkömarkkinalaboratorion tutkimusryhmä koostaa vuosina 2016–2017 suoritettujen tutkimusten tuloksia. Tutkimuksessa on mallinnettu demonstraatiojärjestelmä, joka hyödyntää jo markkinoilla käytössä olevia akkuenergiavarastoja. Kyseiseen järjestelmään pohjautuen on toteutettu MATLAB-sovelluksen avulla erilaisia simulaatiomalleja akkuenergiavarastojen hyötyjen selvittämiseksi eri markkinapaikoilla eri skenaarioissa. Verrattuna aiemmin esiteltyyn tutkimukseen tässä tutkimuksessa huomioitiin myös akkuenergiavaraston mahdollisuus osallistua useille markkinapaikoille samanaikaisesti.

Tutkimuksessa suoritettuun simulaation perustuen on havaittavissa, että sähköakkuenergiavaraston varaustila kyllästyy useammin alarajalle kuin ylärajalle. Tämän selittää se, että akun latausteho on aina pienempi kuin purkuteho, jolloin akku todennäköisesti tyhjenee useammin kuin se täyttyy. Lisäksi tutkimuksessa tärkeänä havaintona huomattiin, että resurssien koordinointi nousee oleelliseksi kysymykseksi, mikäli pyritään tarjoamaan sähköakun toiminnallisuutta usealle markkinapaikalle. Koordinoinnin epäonnistuessa todennäköisyys palvelupyynnön toteuttamisen epäonnistumiselle kasvaa. Esimerkkinä palvelupyynnön epäonnistumisesta tutkimuksessa testausjakson aikana ilmaantui useamman kerran tilanteita, joissa sähköakkuenergiavarastot eivät kyenneetkään toteuttamaan niille ensisijaiseksi asetettua FCR-N-palvelupyyntöä. Taloudellisesta optimointinäkökulmasta simulaation lopputuloksena on todettu, että näillä näkymin tuottavin sovellutus BESS-ratkaisuille löytyy FCR-

N-tuntimarkkinoilta. Tällä markkinapaikalla ja tutkimuksen aikaisilla hinnoilla akkuenergiavarasto maksoi itsensä takaisin 10 vuoden aikana. FCR-D-tuntimarkkinoille osallistuminen sen sijaan osoittautui tutkimuksessa tappiolliseksi, vaikka sitä yritettiin simuloida jopa 60 vuoden käyttöajalla. Yleiseksi ongelmaksi tutkimuksessa muodostui se, että taajuudenhallinta käyttötarkoituksissa akustojen käyttöaste jää liian matalaksi. Tästä voi muodostua ongelma, jossa FCR-N:n vaatiessa aktivaatiota akuston elinikä kuluu loppuun ennen kuin investointikulut on saatu katettua nykyisillä hinta- ja taajuudenvaativuorokausilla. On huomioitava, että tutkimuksen testijakson kestäessä vain puolitoista kuukautta täysin konklusiivisia johtopäätöksiä tuloksista ei voida vetää.

Suunnitellessa BESS-ratkaisua tulee myös ottaa huomioon merkittävänä tekijänä akkuvaraston kulumisen. Akun energia kapasiteetin kärsiessä kuormitusjaksojen lisääntymisen myötä, tulee löytää optimaalinen kuormituksen määrä, jolla reservimarkkinoilta saadut taloudelliset hyödyt ylittävät akun hankintakustannukset. Tämän saavuttaminen vaatii akun omistajalta tarkkaa optimointi, joka hetki siitä mille markkinalle akun kapasiteettiä tarjotaan. Reservimarkkinatuottojen uhatessa jäädä liian pieniksi, siirretään käyttöä spot-markkinaan. (CRA 2023.)

5.2 Kannattavuus spot-markkinoilla

Taloudellinen logiikka spot-markkinoilla perustuu siihen, että osto- ja myyntihinnan erotuksen tulee olla riittävän suuri, jotta sähköakun kapasiteettia on kannattava varata spot-markkinoille reservimarkkinoiden sijasta. Sähköakun käyttö spot-markkinoilla on kuluttavaa sen vaatiessa akulta yhden lataus-purku syklin (Korhonen 2022), kun taas aiemmin käsitellyssä taajuudensäädössä akku ei kulu samalla tavalla, koska akkua ei tarvitse purkaa ja ladata kokonaan tehtäessä vain pientä taajuudensäätöä. Tämä muodostaa oman optimointiongelmansa sähköakun kestävyuden näkökulmasta ja sen aiheuttamista kustannuksista näitä kahta käyttökohdetta vertaillessa.

Esimerkkiskenaariona sähköakkuenergiavarastoa voitaisiin hyödyntää spot-markkinoilla integroimalla se teollisen kokoluokan aurinkovoimalan yhteyteen. Tällöin sähköakkuenergiavaraston avulla siirretään aurinkovoimalan tuotantoa spot-hintojen mukaisesti halvimmilta tunneilta kalleimmille. Käytännössä siis, jos kalleimman ja halvimmän tuntien hintojen erotus muodostuu sähköakkuenergiavaraston syklihintaa eli laskennallista kustannusta per

lataus-purkaus sykli suuremmaksi, ladataan sähköakkuenergiavarastoa. Kun puolestaan hinta on kalleimmillaan, akkua puretaan. (Korhonen 2022.)

Korhosen (2022) toteuttaman tutkielman perusteella on saavutettu lopputulos, jonka mukaan sähköakkuenergiavarasto teollisen aurinkovoimalan yhteydessä ei muodostu kannattavaksi investoinniksi spot-markkinoilla. Työssä käytetyillä lähtöarvoilla investointi ei maksa itseään takaisin akun käyttöiän aikana. Investoinnin kannattavuutta analysoitiin arvioimalla sisäistä korkokantaa, nettonykyarvoa ja korollista takaisinmaksuaikaa. Syyksi kannattamattomuudelle on arveltu sähköakkuenergiavarastojen toistaiseksi puutteellista teknistä ja taloudellista kehitystä. Yksittäiseksi suurimmaksi kannattavuutta haittaavaksi muuttujaksi muodostuu akkupakettien sekä inverttereiden vaatimat uusimiset, jotka aiheuttavat hetkellisesti suuren laskun nettonykyarvoon. Kyseisessä työssä sähköakkuenergiavarasta ei hyödynnetty muilla markkinapaikoilla.

5.3 BESS-optimointipalvelut

Kuten Tikka et al. (2018) tutkimusraportin perusteella todettiin, resurssienkoordinointi sähköakkuenergiavaraston käytössä nousee kynnyskysymykseksi varsinkin, jos akkuvarastoa halutaan tarjota samanaikaisesti useammalle markkinapaikalle. Tämä ongelma on selvästi huomattu ja koettu oleelliseksi ratkaista, sillä sähköakkuenergiavarastojen käytön- ja resurssienkoordinointiin on tarjolla optimointityökaluja tuottavia toimijoita, joista esitellään seuraavaksi yksi.

Capalo AI on suomalaisyhtiö, joka mallintaa tekoälyn avulla energiavarastojen toimintaa ja optimointia eri skenaarioissa sähkömarkkinoilla. Se tarjoaa näitä malleja tilaustyönä asiakkailleen, joina toimivat sähköakkuenergiavarastojen haltijat. (Business Kuopio 2024.)

Capalo AI on tuottanut myös julkisia case-tutkimuksia, joista esimerkkinä Exilionin kanssa toteutettu projekti. Exilion on suomalainen sijoitusyhtiö, joka omistaa Suomessa 380 megawatin edestä tuulivoimaa ja 6 megawatin ja 6,6 megawattitunnin kokoisen sähköakkuenergiavaraston Ii:ssä. Kyseinen sähköakkuenergiavarasto on ollut aktiivisena verkossa viisi vuotta. Ennen yhteistyötä Capalo AI:n kanssa Exilion hallinnoi sähköakkuenergiavaraston toimintaansa reservimarkkinoilla manuaalisesti. Yhteistyön alkaessa tuli Exilionin sähköakkuenergiavarastosta ensimmäinen Suomessa, joka operoi useammalla markkinapaikalla

samanaikaisesti. Samanaikaisen operoinnin usealla markkinapaikalle mahdollistaa Capalo AI:n tarjoamat tekoälypohjaiset algoritmimallit, jotka kykenevät huomiomaan kerralla useamman parametrin, kuten todennäköiset hinta ennusteet, akun toiminta-arvot, monimarkkinatarjousstrategiat ja näiden yhteysvaikutukset sähköakkuenergiavaraston investoinnin optimoimiseksi. (Capalo AI 2023.)

Tuloksena Capalo AI:n tekoäly optimoimisen käyttöönoton jälkeen Exilionin sähköakkuenergiavaraston tuotot kasvoivat 132 % saavuttaen 40 700 €/kuukausi/MW tuloksen. Samaan aikaan sähköakun syklien määrää saatiin vähennettyä 63 %. (Capalo AI 2023.)

6 Sähköakkuenergiavarastoprojektit Suomessa ja maailmalla

Suomessa suuria uusiutuvan energian hankkeita viime vuosina on tuottanut ranskalainen yhtiö Neoen. Neoen on rakennuttanut Pohjoismaiden suurimman akkuvaraston nimeltään Power Reserve One Lappeenrantaan. Kyseisen akkuvaraston nimellisteho on 30 megawattia ja energiakapasiteetti 30 megawattituntia. Power Reserve One on valmistunut vuonna 2020 ja on ensimmäinen suuritehoinen akkuvarasto, joka on kytketty Suomen sähköverkkoon. Kuitenkin jo heti vuoden 2023 lopulla Neoen aloitti uuden projektin Ylikkälä Power Reserve Two-akkuvaraston rakentamisen Lappeenrannassa. Käytön alkaessa vuoden 2025 ensimmäisellä puoliskolla yksikön nimellisteho tulee olemaan 56,4 megawattia ja energiakapasiteetti 112,9 megawattituntia, ollen jälleen Pohjoismaiden suurin akkuvarasto. (Neoen 2023.) Edellä mainittujen projektien lisäksi Lappeenrantaan Mertaniemeen on parhaillaan rakenteilla 38,5 megawatin sähköakkuenergiavarasto. Projektin rahoituksesta vastaavat sijoitusyhtiö Ardina sekä Lappeenrannan Energia. Huomionarvoista on, että Ardina on globaalisti vertailtuna suuren kokoluokan sijoitusyhtiö. Tämä viestii yleisestä kiinnostuksesta sähköakkuurkkimarkkinoihin sekä Suomen kiinnostavuudesta sijoituspaikkana vastaaville projekteille. Itse akkuvaraston laitteiston ja rakennukset toimittaa ylöjärveläinen Merus Power. Mertaniemen sähköakkuenergiavaraston kapasiteettia on tarkoitus tarjota sähkömarkkinoilla nimenaan taajuusreservimarkkinoille. Akkuenergiavarasto rakentuu Mertaniemen voimalaitosalueen yhteyteen, mikä tuo huomattavaa etua, sillä alueella valmiina olevaa infrastruktuuria sekä henkilöstöä pystytään hyödyntämään akkuenergiavaraston käyttöönotossa. Alueelta löytyy valmiina esimerkiksi jo muuntaja. Mertaniemen sähköakkuenergiavaraston on arvioitu valmistuvan toukokuussa 2025. (Lappeenrannan Energia 2024b.)

Euroopan tasolla suurin BESS-projekti on tällä hetkellä alankomaalaisen GIGA Storage yrityksen suunnittelema GIGA Green Turtle-akkuvarasto, jonka rakentaminen aloitetaan vuonna 2025 ja sen on tarkoitus valmistua vuoden 2028 loppuun mennessä. GIGA Green Turtle-akkuvaraston nimellisteho tulee olemaan 60 megawattia, ja energiakapasiteetti 2400 megawattituntia. Tämä mahdollistaa käytännössä sen, että Giga Green Turtle kykenee varastoimaan vuosittain arviolta 330 000:n perheen sähkönkulutuksen edestä sähköä ja vapauttamaan sen verkkoon. Giga Green Turtle tullaan integroimaan 380:n kilovoltin

korkeajännite asemaan, jota operoi yksi Euroopan suurimmista siirtoverkkoyhtiöistä nimeltään Elia. (pv magazine 2024.)

7 Johtopäätökset

Työssä suoritetun sähkömarkkinoiden tilannekatsauksen perusteella muodostui käsitys siitä, että sähköakkuenergiavarastointiratkaisut soveltuvat erinomaisesti Suomessa sähkömarkkinoiden teknisiin vaatimuksiin ja samalla myös uusiutuvien energiantuotantomuotojen luomiin reservitarpeisiin. Sähköakkuemarkkinoiden osoittaessa kiihtyvää trendiä ja poliittisen päätöksenteon tukiessa toimintaympäristöä sekä kasvumahdollisuuksia, vaikuttaa tilanne sähköakkuenergiavarastojen käytölle suotuisalta. Kasvava kiinnostus akkuvarastohankkeisiin näkyy näihin liittyvien hankkeiden lisääntymisenä sekä suurina sijoituksina. Tämä selittyy sillä, että energijärjestelmien ollessa murrosvaiheessa puhtaamman energiantuotannon myötä ovat älykkäät ja joustavuutta lisäävät ratkaisut tarpeen sähköjärjestelmän vakauttamiseksi. Vielä toistaiseksi akkuenergiavarastot ovat kuitenkin melko kallista teknologiaa. Jotta kiinnostavuutta ja käyttöä saataisiin lisättyä entisestään, tulisi teknologian kehittyä ja akkujen hintojen laskea. Työn perusteella huomattiin myös, että sähköakkuenergiavaraston kannattavuus investointina ei aiheesta suoritetun tutkimuskatsauksen perusteella ole selvää. Tutkimuksista voidaan havaita yhteneväinen trendi, jossa sähköakkuu tarjotessa reservimarkkinoille käyttöön vain yhdelle paikalle kerrallaan, ei kannattavaa investointia synny. Myös pelkkä spot-markkinoille tarjoaminen ilman samanaikaista aktivointia reservimarkkinoilla osoittautui tappiolliseksi. Ainoastaan useammalle markkinapaikalle samanaikaisesti tarjottaessa saatiin akkuenergiavarastolle tuottavaa käyttöä. Kun tuottoa saatiin, syntyi parhaimmat tulot FCR-N-markkinoilta. Akkuu tarjottaessa käyttöön vain yhdelle markkinapaikalle, ongelmaksi muodostuu liian matala käyttöaste, joka toisaalta puhuu edelleen sen puolesta, että akkuu on mahdollista ja sitä myöten kannattavaa tarjota useammalle markkinapaikalle. Useammalle markkinapaikalle tarjoamisen kannattavuus on selvästi huomattu jo markkinaosapuolten keskuudessa, sillä sen muodostama resurssienhallinta kysymyksen selvittämiseksi on kehitetty ratkaisuja. Tällä hetkellä ratkaisut ovat tekoälypohjaisia algoritmimalleja, jotka kykenevät huomioimaan usealle markkinapaikalle tarjoamisen muodostaman monimutkaisen ongelman sähköakkuenergiavarastoista saatujen tulojen optimoimiseksi. Lisäksi tekoälypohjainen ratkaisu tulisi samalla mahdollistamaan resurssien vapauttamista muihin tehtäviin. Näin voidaan myös minimoida inhimillisten virheiden mahdollisuutta.

Työn tuloksia voitaisiin jatkossa jalostaa miettimällä, kuinka etenkin markkinakenttää tulisi kehittää Fingridin toimesta, jotta sähköakkuenergiavarastojen käyttöönotto olisi markkinoiden osalta houkuttelevampaa. Fingridin voisi olla mielekästä kehittää esimerkiksi jonkinlainen monimarkkinamalli, joka optimoisi akkuvaraston tarjoamisen useammalle markkinapaikalle taajuuden säätelyn ja sijoituksen kannattavuuden näkökulmasta. Monimarkkinamallin kehittäminen ja simuloiminen voisikin olla jatkossa ajankohtainen ja lisäselvitystä vaativa tutkimuskysymys.

Lähteet

Business Kuopio. 2024. Capalo AI kiihdyttää vihreää siirtymää tekoälyn avulla. [verkkoaineisto]. [Viitattu 14.8.2024]. Saatavissa: <https://www.businesskuopio.fi/menestystarinat/capalo-ai-kiihdyttaa-vihreaa-siirtymaa-tekoalyn-avulla/>

Capalo AI. 2023. Exilion Case Study. [verkkoaineisto]. [Viitattu 17.8.2024]. Saatavissa: <https://capaloai.com/exilion-case-study>

Capalo AI. 2024. Finnish BESS Market. [blogi]. [Viitattu 17.8.2024]. Saatavissa: <https://capaloai.com/blog/finnish-bess-market/>

CRA. 2023. Unlocking the potential – Navigating key considerations in battery energy storage systems. [verkkoaineisto]. [Viitattu 25.8.2024]. Saatavissa: https://media.crai.com/wp-content/uploads/2023/10/16145600/CRA-Whitepaper-BESS_October_2023.pdf

Eco Tree Lithium. 2023. LiFePO4 BATTERY CYCLE LIFE & DURABILITY. [verkkoaineisto]. [Viitattu 23.8.2024]. Saatavissa: <https://ecotreelithium.co.uk/news/lifepo4-battery-cycle-life-and-durability/>

EESI. 2019. Energy Storage. [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2024]. Saatavissa: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>

Elinkeinoelämän keskusliitto. 2024. Green Investments in Finland. [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.7.2024]. Saatavissa: <https://ek.fi/en/green-investments-in-finland/>

EnergiaEki 2024. Mikä on invertteri? [verkkoaineisto]. [Viitattu 20.5.2024]. Saatavissa: <https://www.energiaeki.fi/aurinkopaneelit/invertteri/>

Energiavirasto. 2023. Sähkömarkkinat. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.4.2024]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat>

Fingrid. 2023. Hankintapäätös taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosimarkkinahankinnasta vuodelle 2023. 2023. [verkkoaineisto]. [Viitattu 6.8.2024]. Saatavissa <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/hankintapaatos-taajuusohjatun-kaytto--ja-hairioreservin-vuosimarkkinahankinnasta-vuodelle->

[2023/#:~:text=Vuoden%202023%20vuosimarkkinahinnat%20ovat%3A%20taajuusohjattulle%20käyttöreserville%20%28FCR-N%29%2019%2C10,€%2FMW%2Ch.%20Vuosimarkkinasopimusten%20kokonaisarvo%20on%20noin%2029%2C5%20miljoonaa%20euroa.](#)

Fingrid. 2024a. Reservimarkkinat. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko>

Fingrid. 2024b. Pohjoismainen tasehallinta. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/#tasehallintahankkeen-uutiset>

Fingrid. 2024c. Kuinka sähkö kulkee. [verkkoaineisto]. [Viitattu 5.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/kuinka-sahko-kulkee/>

Fingrid. 2024d. Esittely. [verkkoaineisto]. [Viitattu 5.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/>

Fingrid. 2024e. Reservilajit. [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko#reservilajit>

Fingrid. 2024f. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). [verkkoaineisto]. [Viitattu 10.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>

Fingrid. 2024g. Nopea taajuusreservi (FFR). [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>

Fingrid. 2024h. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) 2024. [verkkoaineisto]. [Viitattu 18.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>

Fingrid. 2024i. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) 2024. [verkkoaineisto]. [Viitattu 18.3.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>

Fingrid. 2024j. Kuinka osallistua reservimarkkinoille 2024. [verkkoaineisto]. [Viitattu 16.8.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>

Fingrid. 2024k. Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosimarkkinahankinta 2024 [verkkoaineisto]. [Viitattu 4.8.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/taajuusohjatun-kaytto--ja-hairioreservin-vuosimarkkinahankinta-2024/>

Fingrid. 2024l. Ansaintamallit 2024. [verkkoaineisto]. [Viitattu 24.7.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>

Fingrid. 2024m. Säätosähkön määrä ja hinta [verkkoaineisto]. [Viitattu 25.8.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/saatosahkon-maara-ja-hinta/#saatosahkon-maara>

Flux Power. 2020. What is the Energy Density of a Lithium-Ion Battery? [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.5.2024]. Saatavissa: <https://www.fluxpower.com/blog/what-is-the-energy-density-of-a-lithium-ion-battery>

Fortum. 2018. Knowledge Sharing Materials. [verkkoaineisto]. [Viitattu 14.7.2024]. Saatavissa: https://lahienergia.org/wp-content/uploads/Aalto_Knowledge_Sharing_Materials.pdf

Korhonen, A. 2024. Sähkövaraston hyödyntäminen vesivoimalaitoksen yhteydessä. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUT Energiajärjestelmät, Energiatekniikka.

Korhonen, J.-P. 2022. Teollisen kokoluokan aurinkovoimalan ja akkuenergiavaraston kannattavuus ja hyödyntäminen sähkömarkkinoille. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUT Energiajärjestelmät, Sähkötekniikka.

Lappeenrannan Energia. 2024a. Tietoa meistä. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.4.2024]. Saatavissa: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/tietoa-meista/yhtio/lappeenrannan-energia>

Lappeenrannan Energia. 2024b. Lappeenrannan Energia ja sijoitusyhtiö Ardian rakentavat sähköakkuvaraston Mertaniemeen. [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.8.2024]. Saatavissa: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/tiedote/lappeenrannan-energia-ja-sijoitusyhtio-ardian-rakentavat-sahkoakkuvaraston-mertaniemeen>

McKinsey & Company. 2023. Enabling renewable energy with battery energy storage systems. [verkkoaineisto]. [Viitattu 18.6.2024]. Saatavissa:

<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/enabling-renewable-energy-with-battery-energy-storage-systems>

Neoen. 2023. Neoen aloittaa Suomessa kapasiteetiltaan Pohjoismaiden suurimman akkuvastaston rakentamisen. [verkkoaineisto]. [Viitattu 18.6.2024]. Saatavissa: <https://finland.neoen.com/fi/uutiset/2023/neoen-aloittaa-suomessa-kapasiteetiltaan-pohjoismaiden-suurimman-akkuvaraston-rakentamisen/>

Nextmsc. 2023. Finland Battery Market Size and Share Statistics - 2030. [verkkoaineisto]. [Viitattu 18.6.2024]. Saatavissa: <https://www.nextmsc.com/report/finland-battery-market>

Pebblex. 2023. Load cycles and useful life in BESS. [verkkoaineisto]. [Viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: <https://bepebblex.com/en/cycles-charge-useful-life-bess/>

pv Magazine. 2024. Europe's largest battery storage project secures approval. [verkkoaineisto]. [Viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: <https://www.pv-magazine.com/2024/04/19/europes-largest-battery-storage-project-secures-approval/>

SSE Energy Solutions. 2023. Behind the meter and in front of the meter. [verkkoaineisto]. [Viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: <https://www.sseenergysolutions.co.uk/behind-the-meter-and-in-front-of-the-meter>

Statista. 2024. Global battery market size by technology. [verkkoaineisto] [Viitattu 29.5.2024]. Saatavissa: <https://www.statista.com/statistics/503105/worldwide-lithium-ion-battery-market-size/>

Sweco. 2023. Akustot energian varastointiin. [blogi]. [Viitattu 1.7.2024]. Saatavissa: <https://www.sweco.fi/blog/akustot-energian-varastointiin/>

Syncron Tech. 2024. Akkuvastosten käyttö reservimarkkinoilla. [blogi]. [Viitattu 1.7.2024]. Saatavissa: <https://www.syncrontech.com/blogi/akkuvarastosten-kaytto-reservi-markkinoilla>

Targray. 2011. Li-ion Battery Materials. [verkkoaineisto]. [Viitattu 23.8.2024]. Saatavissa: <https://www.targray.com/li-ion-battery/electrolyte>

Tikka, V., Belonogova, N., Honkapuro, S., Lassila, J., Haakana, J., Lana, A., Romanenko, A., Haapaniemi, J., Narayana, A., Kaipia, Niemelä, H., Partanen, J. 2018. LUT Scientific

and expertise publications. Multi-objective role of battery energy storages in an energy system.

Tossavainen, T. 2023. Sähköakun käyttö sähköverkon taajuuden säädössä. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUT Energiajärjestelmät, Sähkötekniikka.

Valtioneuvosto. (2024). Kasvupaketti 16.4.2024. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.8.2024]. Saatavissa:

<https://valtioneuvosto.fi/documents/10616/199806183/Kasvupaketti+16.4.2024.pdf/c867e33b-faea-d211-b22a-3b19b2394a89/Kasvupaketti+16.4.2024.pdf?t=1713272175558>

Vattenfall. 2024. Taustatietoa sähkön hinnan vaihtelusta. [verkkoaineisto]. [Viitattu 10.8.2024]. Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/taustatietoa-sahkon-hinnanvaihtelusta/>