



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jari Piuhola

MATKAVIESTINVERKON VARAVIRTA-
AKUSTOJEN HYÖDYNTÄMINEN
SÄHKÖMARKKINOILLA

Tekniikka
2025

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Piuhola, Jari
Opinnäytetyön nimi	Matkaviestinverkon varavirta-akustojen hyödyntäminen sähkömarkkinoilla
Vuosi	2025
Kieli	suomi
Sivumäärä	57 + 1 liite
Ohjaaja	Mikko Pieskä

Tämä opinnäytetyö tutkii Telia Finland Oyj:n omistamien matkaviestinverkon tukiasemien varavirta-akustojen hyödyntämistä sähkömarkkinoilla, erityisesti reservimarkkinoilla. Tutkimuksen tavoitteena on muuttaa operaattorien välttämätön kuluerä tulonlähteeksi. Tutkimus toteutettiin laadullisena tapaustutkimuksena, jossa keskityttiin yhteen suomalaiseen teleoperaattoriin ja sen matkaviestinverkossa käytössä oleviin akkusähkövarastoihin. Aineistonkeruumenetelminä käytettiin puolistrukturoituja haastatteluja ja dokumenttianalyysiä.

Tutkimuksen keskeiset havainnot osoittivat, että matkaviestinverkon tukiasemien akustot voivat toimia varavoimana sähkökatkosten aikana ja osallistua sähköverkon taajuuden säätelyyn tarjoamalla nopeaa taajuusreserviä (FFR). Tämä auttaa ylläpitämään sähköverkon tasapainoa ja varmistaa, että sähköntuotanto ja -kulutus ovat jatkuvasti tasapainossa. Taajuuden säätelyyn osallistuminen voi tuoda merkittäviä tuloja reservimarkkinoilta.

Johtopäätöksenä todettiin, että hajautetun akkusähkövaraston hyödyntäminen sähkömarkkinoilla on liiketoiminnallisesti kannattavaa. Energiavaraston kapasiteetti ja tehontuotto ovat riittäviä osallistumaan markkinoille, ja markkinoilta on mahdollista saada merkittävää tuottoa olemassa olevia akustoja hyödyntämällä. Lisäksi tutkimus osoitti, että reservimarkkinoiden kehittyminen ja kasvava tarve säätökapasiteetille luovat uusia liiketoimintamahdollisuuksia teleoperaattoreille.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	10
2	ENERGIAN VARASTOINTI	12
	2.1 Mekaaninen energian varastointi.....	12
	2.2 Vesivoiman energian varastointi	13
	2.3 Termodynaaminen energian varastointi	14
	2.4 Sähkökemiallinen energian varastointi.....	14
	2.4.1 Akkuteknologian perusteet.....	15
	2.4.2 Akkutyyppejä.....	16
	2.4.3 Akut energiavarastona	18
	2.5 Energian varastointi vedyn avulla.....	19
	2.6 Energian varastointi ammoniakkin avulla	20
3	TUTKIMUSMENETELMÄT.....	21
	3.1 Tutkimusasetelma.....	21
	3.2 Tutkimuksen reunaehdot ja tutkimuskysymys	22
	3.3 Aineistonkeruumenetelmät.....	22
	3.4 Aineiston analyysi	23
	3.5 Eettiset näkökohdat.....	23
	3.6 Liiketoiminnalliset hyödyt.....	23
4	SÄHKÖMARKKINAT JA MARKKINAPAIKAT.....	25
	4.1 Sähkön hinnanmuodostus	25
	4.2 Sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat	25
	4.3 Sähkön johdannaismarkkinat.....	27
	4.4 Sähkön vuorokausimarkkinat	27
	4.5 Sähkön päivänsisäiset markkinat.....	27
	4.6 Taseselvitys	28

5	SÄÄTÖSÄHKÖ- JA RESERVIMARKKINAT	29
5.1	Reservimarkkinat	29
5.1.1	Nopea taajuusreservi (FFR)	31
5.1.2	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D)	31
5.1.3	Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)	31
5.1.4	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	31
5.2	Reservimarkkinoille liittyminen	32
5.3	Kaupankäynti reservimarkkinoilla	32
5.4	Ennuste reservimarkkinoiden kehittymisestä	32
5.5	Ansaintamallit	33
6	SÄHKÖVERKKOON LIITTYMINEN JA SÄHKÖVARASTOJEN VAATIMUKSET	35
6.1	Liittyminen sähköverkkoon	35
6.2	Sähkövarastojen tekniset vaatimukset	35
7	TUTKIMUSKOHTTEEN ENERGIAVARASTON OMINAISUUDET	37
7.1	Matkaviestinverkosta lyhyesti	37
7.2	Tukiasemien määrän arviointia	37
7.3	Tukiasemien akustojen tekniset ominaisuudet	38
7.4	Tukiasemien akustojen energiavaraston ja tehontuoton arviointia	40
7.5	Energiavaraston hyödyntäminen sähkömarkkinoilla	41
7.5.1	Nopea taajuusreservi FFR	42
7.5.2	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi	42
7.5.3	Energiavaraston käyttötapaukset	44
8	TUTKIMUSKOHTTEEN LIIKETOIMINNALLISEN HYÖDYN ARVIOINTIA	45
8.1	Nopean taajuusreservin (FFR) hankinta- ja ansaintamallit	45
8.2	Vuosittaisen bruttotuoton arviointi reservituottolaskurin avulla	45
8.3	Vuosittaisen bruttotuoton arviointi avoimen datan avulla	47
8.4	Vuosittaiset operatiiviset kulut	49
8.4.1	Reservimarkkinalle liittymisen kustannukset	49
8.4.2	Reservimarkkinoilla toimimisen kustannukset	49
8.5	Vuosittainen tuotto toteutuneeseen dataan perustuen	51

8.6	Tulevan tuoton simulointi Monte Carlo -mallilla.....	51
8.6.1	Monte Carlo -mallin esittely.....	51
8.6.2	Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt muuttujat.....	52
8.7	Yhteenveto eri tuottolaskelmien tuloksista.....	55
9	YHTEENVETO	57
	LÄHTEET	58
	LIITTEET	64

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Pumppuvoimalan havainnekuva (AlShafi & Bicer, 2021, s. 4).....	14
Kuva 2. Akkukennon ionien ja elektronien liike kuormituksessa (Michael C. Hoff, 2022, s. 144).....	16
Kuva 3. Sähköstä käydään kauppaa erilaisilla markkinapaikoilla. (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-a).....	26
Kuva 4. Sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet toimituspäivänä ja sitä edeltävänä päivänä fyysisten tuotteiden osalta. Markkina-ajat esitetty Suomen ajassa (EET). (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-b).....	26
Kuva 5. Reservituotteet esitettynä tuotteittain ja aktivointiaikoinen (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-c).....	30
Kuva 6. Ennusteen mukaan reservikapasiteetin tarve kasvaa 134% seuraavien 5 vuoden aikana. (<i>Fingridlehti</i> , ei pvm.-a).....	33
Kuva 7. Sähkövaraston tyyppiluokittelu tuotantotilan mitoitus- ja liittymispisteen jännitetaso perusteella. (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-d).....	35
Kuva 8. Marathon M FT / M12V100FT akuston purkutehot eri tyhjennussyvyyksin. (Marathon M FT / M12V100FT, ei pvm.).....	39
Kuva 9. Fingridin reservituottolaskurin mukainen vuosituotto eri reservilajeille vuoden 2024 aikana. Nopean taajuusreservin tuotto korostettuna. (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-e).....	46
Kuva 10. Monte Carlo -simulaation tulos 3000 simulaation otannalla.....	54
Kuva 11. Monte Carlo -simulaation tulos esitetty frekvenssi-kuvaajana tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi.....	54

Taulukko 1. Vuosittainen potentiaalinen reservituotto 1MW reservikykyä kohti (<i>Fingrid Oyj</i> , ei pvm.-f).....	47
Taulukko 2. Monte Carlo -simulaatiossa käytettyjen muuttujien arvot.....	53
Taulukko 3. Monte Carlo -simulaation perusteella lasketut tuottotodennäköisyydet 10 vuoden ajanjaksolta.....	55

LIITELUETTELO

LIITE 1. Monte Carlo -simulaatio (Ms Excel)

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on yksi aikamme suurimmista haasteista ja sen vaikutukset ovat jo nähtävissä ympäri maailmaa. Ilmaston lämpeneminen, merenpinnan nousu ja äärimmäiset sääilmiöt ovat vain muutamia esimerkkejä siitä, miten ihmisen toiminta on muuttanut planeettamme ilmastoja. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on merkittävin kasvihuonekaasupäästöjen lähde ja siksi on välttämätöntä löytää kestäviä ja ympäristöystävällisiä energiaratkaisuja.

Siirtyminen fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin, kuten tuuli- ja aurinkoenergiaan, tuo mukanaan myös haasteita. Uusiutuvat energialähteet ovat luonteeltaan vaihtelevia, mikä tarkoittaa, että sähköntuotanto ei ole aina ennustettavissa. Tämä voi aiheuttaa haasteita sähköverkon tasapainon ylläpitämisessä. Sähkön varastointiteknologioiden kehittäminen ja nykyistä parempi hyödyntäminen on keskeistä, jotta voidaan tasapainottaa tuotannon ja kulutuksen vaihtelut. Perinteiset fossiiliset voimalaitokset tarjoavat säädettävää tuotantokapasiteettia, jota voidaan lisätä tai vähentää tarpeen mukaan. Uusiutuvien energialähteiden myötä tarvitaan uusia tapoja hallita tuotannon ja kulutuksen vaihteluita.

Energiamurros tulee nostamaan sähkön reservimarkkinoiden merkitystä entisestään sähköverkon tasapainottamisessa. Reservimarkkinoille varattu kapasiteetti auttaa sähköverkon taajuuden hallinnassa, erityisesti äkillisissä muutostilanteissa, kuten tuotannon tai kulutuksen äkillisesti muuttuessa. Reservimarkkinoiden avulla sähköjärjestelmä selviää äkillisistä häiriöistä ja siirtojen hallinnan haasteista. Tämä tekee niistä olennaisen osan sähköverkon toimintavarmuuden takaamisessa. Lisäksi reservimarkkinat tarjoavat energiantuottajille ja sähkövarastointiratkaisujen omistajille mahdollisuuden osallistua sähköverkon tasapainottamiseen ja saada lisätuloja.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Telia Finland Oyj:n omistamien matkaviestinverkon tukiasemien varavirta-akustojen hyödyntämistä

sähkömarkkinoilla, erityisesti reservimarkkinoilla, ja muuttaa operaattorien välttämätön kuluerä tulonlähteeksi. Työn tuloksena saadaan tietoa, joka voi toimia pohjana liiketoimintapäätöksiä tehtäessä sekä auttaa ymmärtämään paremmin olemassa olevien akustojen tehon hyödyntämisen mahdollisuuksia ja rajoitteita tulevaisuudessa. Akustojen tarjoaman tehon tuominen sähkömarkkinoille auttaisi myös osaltaan Suomen sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Lisäksi tämä tutkimus voi edistää kestävä kehityksen tavoitteita ja tarjota mallin muille yrityksille, jotka haluavat hyödyntää varavirta-akustojaan tehokkaammin.

2 ENERGIAN VARASTOINTI

Ilmastonmuutoksen vuoksi energiajärjestelmien kautta maailman täytyy käydä läpi valtavan muutoksen ja vieläpä erittäin nopeassa tahdissa siirryttäessä päästöttömiin energiantuotantomuotoihin, jotta elämä maapallolla voisi jatkua nykyisessä muodossaan. (*Climate regulating ocean plants and animals are being destroyed by toxic chemicals and plastics, 2021*)

Sähkövarastojen rooli korostuu meneillään olevassa energiamurroksessa. Ne tukevat uusiutuvan energian, kuten aurinko- ja tuulivoiman, integrointia sähköverkkoon ja tarjoavat joustavuutta vaihtelevan tuotannon hallintaan. Sähkövarastot ovat myös keskeisiä päästöjen vähentämisessä ja energian varastoinnissa, mikä on tärkeää tulevaisuuden sähköjärjestelmien vakauden ja tehokkuuden kannalta (*Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, 2017, s. 10*)

IRENA (International Renewable Energy Agency) julkaisi 2017 tutkimusraportin, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, missä on kuvattu kattavasti energian varastoinnin menetelmiä ja sovelluksia. Vastaavasti Michael C. Hoff on kuvannut 2022 julkaistussa teoksessaan *Energy Storage Technologies and Applications* keskeisimmät energianvarastoinnin menetelmät. Seuraavissa kappaleissa on tiivistetty keskeisimmät menetelmät energian varastointiin liittyen.

2.1 Mekaaninen energian varastointi

Mekaaninen energianvarastointi jaetaan Michael C. Hoffin (2022) mukaan kahteen pääsovellukseen: Kineettiseen energian varastointiin ja potentiaalienergian varastointiin.

Kineettinen energian varastointi tarkoittaa esimerkiksi vauhtipyöriä, jotka varastoivat energiaa pyörivään massaansa. Vauhtipyörät tunnetaan korkeasta tehotiheydestään ja pitkästä elinkaarestaan. Ne ovat erityisen hyödyllisiä

sovelluksissa, jotka vaativat nopeita lataus- ja purkusyklejä, kuten taajuuden säätelyssä.

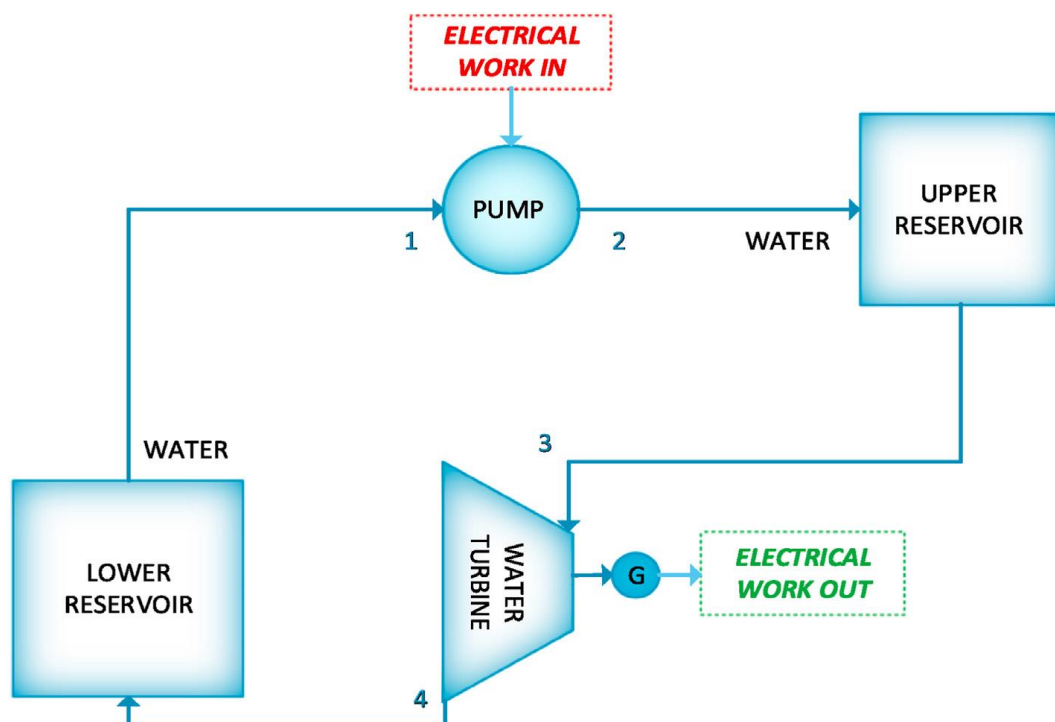
Potentiaalienergian varastointi sisältää esimerkiksi järjestelmiä, jotka varastoivat energiaa nostamalla massoja ja vapauttamalla sen tarvittaessa.

Mekaaniset energian varastointijärjestelmät ovat kestäviä ja pitkäikäisiä. Ne soveltuvat sähköverkon sovelluksiin, mutta vaativat merkittävästi tilaa ja infrastruktuuria.

2.2 Vesivoiman energian varastointi

Pumppuvoimavarastointi tai pumppuvoimala (PHES) tarkoittaa veden siirtämistä kahden eri korkeudella olevan säiliön välillä. Se on maailmanlaajuisesti käytetyin energian varastointimuoto. Lähes 97% kaikesta energiavarastotehosta vuonna 2020 oli pumppuvoimaloita. PHES-järjestelmät voivat varastoida suuria määriä energiaa, mutta ne vaativat erityisiä maantieteellisiä olosuhteita. Pumppuvoimaloita käytetään suurten energiamäärien varastointiin, taajuuden säätelyyn ja sähköverkon vakauden ylläpitämiseen (Michael C. Hoff, 2022, ss. 77–78).

Alla olevassa havainnekuvassa on esitetty pumppuvoimalan toimintaperiaate. Sähköllä toimiva pumppu pumppaa veden ylempään säiliöön esimerkiksi edullisen ylijäämäsihtin avulla. Ylemmästä altaasta vettä juoksetetaan turbiinin läpi alemmalla tasolla sijaitsevaan altaaseen. Näin pystytään vastaamaan esimerkiksi kasvaneeseen sihtin kysyntään kulutushuippujen aikana. (AlShafi & Bicer, 2021, s. 2)



Kuva 1. Pumppuvoimalan havainnekuva (AlShafi & Bicer, 2021, s. 4)

2.3 Termodynaaminen energian varastointi

Termodynaamisella energian varastoinnilla tarkoitetaan Michael C. Hoffin (2022) mukaan esimerkiksi paineistetun ilman varastointia (CAES) sekä lämpöenergian varastointia. Paineilman energian varastointi (CAES) käyttää sähköä ilman puristamiseen, joka varastoidaan ja vapautetaan myöhemmin sähkön tuottamiseksi. Kehittyneet CAES-järjestelmät pyrkivät parantamaan tehokkuutta talteen ottamalla ja uudelleen käyttämällä lämpöä. Lämpöenergian varastointi sisältää esimerkiksi aistittavan lämmön varastoinnin (esim. sulat suolat) ja latenttilämmön varastoinnin (esim. faasimuutosmateriaalit). Lämpöenergian varastointi integroidaan usein aurinkovoimaloihin jatkuvan sähkön tuottamiseksi.

2.4 Sähkökemiallinen energian varastointi

Sähkökemiallinen energian varastointi on keskeinen osa nykyaikaista energiajärjestelmää, ja se perustuu akkujen kykyyn varastoida ja vapauttaa energiaa sähkökemiallisten reaktioiden avulla, kuten Hoff (2022) asian esittää.

Tämä kappale käsittelee sähkökemiallisen energian varastoinnin perusteita, keskeisiä komponentteja ja eri akkutyyppejä, jotka ovat muokanneet ja tulevat muokkaamaan energian varastointimarkkinoita.

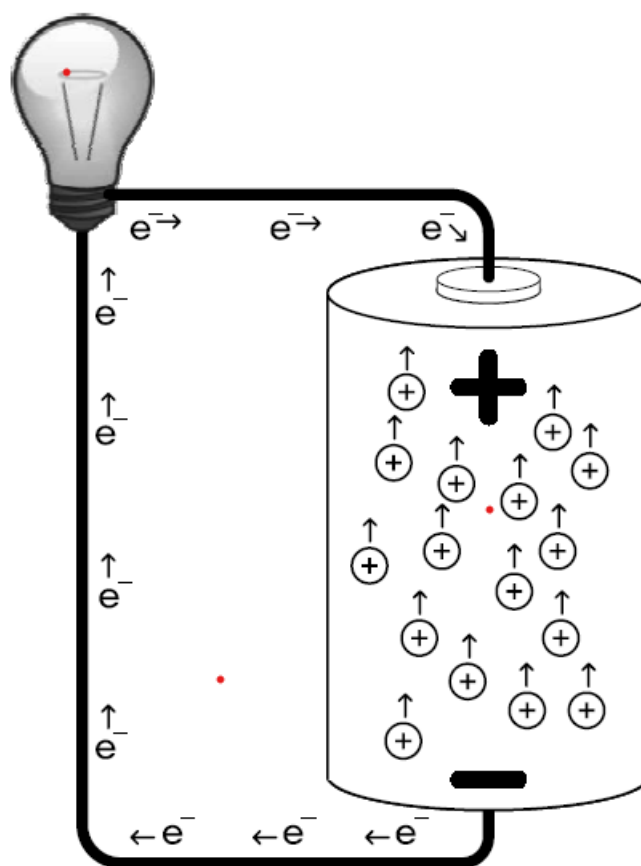
2.4.1 Akkuteknologian perusteet

Akkuteknologian perusteet on kuvattu havainnollisesti Michael C. Hoffin teoksessa *Energy Storage Technologies and Applications (2022)*. Akkuteknologian ytimessä on Hoffin mukaan kuusi keskeistä komponenttia:

1. **Anodi (negatiivinen elektrodi):** Vastaanottaa elektronit ulkoisesta piiristä latauksen aikana. Anodi on yleensä valmistettu materiaalista, joka voi helposti luovuttaa elektroneja, kuten grafiitista litiumioniakuissa.
2. **Katodi (positiivinen elektrodi):** Vastaanottaa elektronit ulkoisesta piiristä purkauksen aikana. Katodi on valmistettu materiaalista, joka voi helposti vastaanottaa elektroneja, kuten litiumkoolttioksidista litiumioniakuissa.
3. **Elektrolyytti:** Mahdollistaa ionien liikkumisen anodilta katodille ja päinvastoin. Elektrolyytti voi olla nestemäinen, kiinteä tai geelimäinen, ja sen tehtävänä on varmistaa ionien vapaa liikkuminen ilman, että elektronit pääsevät kulkemaan suoraan elektrodien välillä.
4. **Erotin:** Estää elektrodien kosketuksen ja oikosulun, mutta sallii ionien liikkumisen. Erotin on yleensä valmistettu huokoisesta materiaalista, joka imee elektrolyyttiä ja mahdollistaa ionien liikkumisen.
5. **Kennon kotelo:** Suojaa kennon sisäisiä komponentteja ja pitää ne paikallaan. Kotelo voi olla sylinterimäinen, prismamainen tai joustava pussi, riippuen sovelluksesta ja vaaditusta energiatihedystä.
6. **Ionit:** Liikkuvat elektrolyytin läpi ja mahdollistavat sähkökemialliset reaktiot. Esimerkiksi litiumioniakuissa litiumionit liikkuvat anodilta katodille ja päinvastoin.

Sähkövirta syntyy elektronien liikkeesta negatiivisesta varauksesta kohti positiivista tai vähemmän negatiivista varausta. Akkukennossa elektronien liike syntyy kun ionit siirtyvät kennon sisällä anodilta katodille elektrolyytin läpi. Samaan aikaan elektronit kulkevat ulkoisen piirin kautta anodilta katodille. (Michael C. Hoff, 2022, s. 143)

Alla olevassa kuvassa on esitetty havainnekuva akkukennon toiminnasta.



Kuva 2. Akkukennon ionien ja elektronien liike kuormituksessa (Michael C. Hoff, 2022, s. 144)

2.4.2 Akkutyyppejä

Hoff esittelee teoksessaan Energy Storage Technologies and Applications (2022) useita erilaisia akkutyyppejä, joista tärkeimmät kuvattu alla.

Lyijyakut ovat vanhimpia ja laajimmin käytettyjä akkuteknologioita. Niiden etuja ovat alhaiset kustannukset ja luotettavuus, mutta ne kärsivät alhaisesta energiatiheydestä ja rajallisesta syklien määrästä. Lyijyakkujen kemia perustuu lyijyn ja lyijydioksidin reaktioihin rikkihapon kanssa, mikä mahdollistaa energian varastoinnin ja vapauttamisen. (Michael C. Hoff, 2022, ss. 152–153)

Nikkelikadmium- ja nikkelimetallihydridiakut eli nikkeliakut tarjoavat paremman suorituskyvyn kuin lyijyakut, mutta ne ovat kalliimpia ja niillä on ympäristöongelmia. Nikkelikadmiumakut ovat tunnettuja pitkästä elinkaarestaan ja kyvystään toimia laajalla lämpötila-alueella, kun taas nikkelimetallihydridiakut ovat ympäristöystävällisempiä ja niillä on suurempi energiatiheys. (Michael C. Hoff, 2022, ss. 162, 174)

Litiumioniakut ovat nykyään suosituimpia akkuja korkean energiatiheydensä ja tehokkuutensa vuoksi. Ne ovat kevyitä, latautuvat nopeasti ja kestävät useita lataus- ja purkusyklejä. Litiumioniakkujen sovellukset vaihtelevat kulutuselektroniikasta sähköajoneuvoihin ja sähköverkon varastointiin. Niiden kemia perustuu litiumionien liikkumiseen anodilta katodille ja päinvastoin elektrolyytin läpi. (Michael C. Hoff, 2022, s. 175)

Natrium eli Natriumrikki- ja natriumioniakut ovat nousevia teknologioita, joilla on potentiaalia laajamittaiseen energian varastointiin. Natriumrikkiakut toimivat korkeissa lämpötiloissa ja tarjoavat korkean energiatiheyden, kun taas natriumioniakut ovat ympäristöystävällisempiä ja edullisempia valmistaa kuin litiumioniakut. (Michael C. Hoff, 2022, ss. 199–201)

Virtausakut, kuten vanadiini-redox- ja sinkki-bromi-akut, varastoivat energiaa nestemäisiin elektrolyytteihin. Ne ovat skaalautuvia ja niillä on pitkä elinkaari, mikä tekee niistä sopivia laajamittaiseen energian varastointiin. Virtausakkujen etuna on niiden kyky tarjota vakaa teho ja kapasiteetti pitkän ajan kuluessa. (Michael C. Hoff, 2022, s. 204)

2.4.3 Akut energiavarastona

Akkujen avulla muodostettu energiavarasto vaatii toimiakseen yleensä seuraavat komponentit: Akkukenoista kootut moduulit (Battery Pack), jännitesovittimen (Power Conversion System, PCS), akkujen hallintajärjestelmän (Battery Management System, BMS), Lämmönhallintajärjestelmä (Thermal Management System, TMS) ja verkkoliitynnän (Grid Connection). (Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, 2017, s. 39)

Akkumoduulit ovat yksittäisiä akkuja, jotka on yhdistetty toisiinsa. Jokainen moduuli koostuu useista kennoista, jotka tuottavat sähköä kemiallisten reaktioiden avulla. Akkuvarastojen ominaisuudet määräytyvät pääosin siinä käytettyjen akku-kennojen teknologiasta. (Michael C. Hoff, 2022, ss. 147–148)

Jännitesovitin toimii rajapintana akkuvaraston ja sähköverkon välillä. Jännitesovitin ylläpitää jännitteen ja taajuuden tietyissä rajoissa, varmistaen, että verkkoon syötetty energia on korkealaatuista ja täyttää verkon vaatimukset. (Michael C. Hoff, 2022, s. 148)

Akkujen hallintajärjestelmä valvoo ja hallitsee akkujen latausta ja purkausta. Se varmistaa, että akut toimivat turvallisesti ja tehokkaasti, estäen ylikuumentumisen ja yllilatauksen. (Michael C. Hoff, 2022, s. 149)

Lämmönhallintajärjestelmä ylläpitää akkujen lämpötilan optimaalisella alueella. Liian korkea tai matala lämpötila voi heikentää akkujen suorituskykyä ja lyhentää niiden käyttöikää. (Michael C. Hoff, 2022, s. 150)

Akkuvarastojen merkittävä etu muihin varastointiteknologioihin nähden on niiden korkea energiatiheys ja modulaarisuus. Tämä mahdollistaa akkuvarastojen valmistamisen ja toimittamisen eri kokoisina yksiköinä. Erilaisten akkuteknologioiden valtava määrä tarjoaa laajan ominaisuuskirjon, mikä tekee akuista erittäin joustavia ja soveltuvia monenlaisiin ympäristöihin. Akkuvarastoja voidaan käyttää pienistä, yksittäisen kodin tarpeisiin vastaavista yksiköistä aina

suuriin, kokonaista sähköverkkoa palveleviin yksiköihin. (Michael C. Hoff, 2022, s. 235)

2.5 Energian varastointi vedyn avulla

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) on kuvannut vedyn tuotantoa energiaa kuluttavaksi prosessiksi. Tämä johtuu siitä, että vety on aina sitoutunut muihin yhdisteisiin, kuten hiilivetyihin tai veteen ja on näin ollen aina erotettava näistä yhdisteistä, jotta vetyä voidaan hyödyntää. (Tukes, ei pvm.)

Tukes kuvaa vedyn tuotannon osalta ilmastonmuutoksen ja hiilidioksidipäästöjen kannalta parhaimmaksi tavaksi elektrolyysin, missä tarvittava sähköenergia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Tällöin vedystä käytetään nimitystä vihreä vety. Elektrolyysissä hyödynnetään sähkökemiallista reaktiota, millä veden vety ja happi erotetaan toisistaan. Jotta vihreää vetyä saataisiin tuotettua 1 kg, tarvitaan sähköenergiaa tyypillisesti noin 55 kWh. Suuri osa tarvittavasta sähköenergiasta, jopa 30%, muuttuu prosessissa lämmöksi. Elektrolyysereitä on kehitetty useilla eri teknologioilla, joista yleisin on alkalielektrolyysi, mikä on ollut pisimpään käytössä. Muita teknologioita ovat muiden muassa kiinteäoksidi-elektrolyysi (SOEC) ja protoninvaihtomembraani-elektrolyysi (PEM). (Tukes, ei pvm.)

Tukesin mukaan vedyn käsittely ja varastointi aiheuttaa haasteita. Vetyatomi on erittäin pienikokoinen ja normaalioloissa se on kaasumainen energiatihyden ollessa vain 3 Wh/l. 1 Kg vetykaasua normaalissa lämpötilassa ja ilmanpaineessa vaatii 11 m³ tilavuuden. Jotta vedyn varastointi olisi kannattavaa, se vaatii korkean varastointitiheyden, jolloin vaadittava tilavuus pienenee. Vedyn varastoimiseksi on erilaisia muotoja, mitkä voidaan jakaa kemiallisiin ja fysikaalisiin varastoihin. (Tukes, ei pvm.)

Vedyn varastoinnissa ja kuljetuksen helpottamiseksi voidaan apuna käyttää muita aineita, jolloin puhutaan vedynkantajista. Vedyn yhdistäminen kantajien kanssa muodostaa niin sanottuja reformoituja polttoaineita. Yleisimmät reformoidut

polttoaineet ovat metanoli ja ammoniakki, mitkä vaativat usein hiililähteen, mikä on ongelmallista ilmastonmuutoksen kannalta. Lupaavin vedyn kantaja on ammoniakki, vaikka se on erittäin myrkyllistä ja ammoniakin poltossa syntyy typen oksideita. Lisäksi ammoniakki tarvitsee paljon energiaa synteessin aikana. (Tukes, ei pvm.)

2.6 Energian varastointi ammoniakin avulla

Vedyn varastointi on vaikeaa ja kallista, mutta ammoniakin varastointi ja kuljetus on helpompaa ja halvempaa. Ammoniakin hyödyntäminen saattaa olla merkittävässä roolissa tulevaisuudessa myrkyllisyydestään huolimatta siirryttäessä uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiseen. Ammoniakkia voidaan varastoida nestemäisessä muodossa, mikä tekee siitä ihanteellisen uusiutuvan energian varaston. Yöllä ylimääräinen energia voidaan käyttää ammoniakin tuotantoon ja varastoida myöhempää käyttöä varten. Ammoniakki voidaan myös hajottaa vedyn tuottamiseksi ja käyttää polttokennoissa. (Elalfy ym., 2024, s. 17)

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Suorittamassani tutkimuksessa hyödynsin tapaustutkimusta, joka on laadullinen tutkimusmenetelmä. Tapaustutkimuksen avulla pyritään saamaan syvälinen ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä sen luonnollisessa kontekstissa (Markus Laine ym., 2007, s. 15). Laineen ja muiden toimittamassa teoksessa *Tapaustutkimuksen taito* (2007) käsitellään tapaustutkimuksen erityispiirteitä ja sen soveltamista tutkimustyössä.

Tutkimusta voisi tarkastella myös kehittämistutkimuksena, koska tutkimuksen tuotoksena pyritään löytämään selkeä malli liiketoiminnallisten tuottojen parantamiseksi hyödyntämällä olemassa olevaa infrastruktuuria nykyistä monipuolisemmin. Kehittämistutkimus pyrkii tuottamaan käytännönläheistä tietoa ja ratkaisuja, jotka ovat suoraan sovellettavissa liiketoiminnassa (Katri Ojasalo ym., 2014, s. 23). Ojasalo ja muut korostavat toimittamassaan teoksessa *Kehittämistyön menetelmät* (2014), että kehittämistutkimus on joustava ja mahdollistaa monipuolisten aineistojen käytön.

Tutkimukseeni ei kuitenkaan sisälly varsinainen kehittämisvaihe liiketoiminnallisten hyötyjen ulosmittaamiseksi, joten tapaustutkimus kuvaa tutkimusmenetelmää paremmin.

3.1 Tutkimusasetelma

Tutkimus toteutetaan laadullisena tapaustutkimuksena, jossa keskitytään yhteen suomalaiseen teleoperaattoriin ja teleoperaattorin matkaviestinverkossa käytössä oleviin akkusähkövarastoihin varastoidun energian hyödyntämiseen sähkömarkkinoilla. Tapaustutkimuksen avulla pyritään ymmärtämään syvälinisesti, miten hajautettua akkusähkövarastoa voidaan parhaiten hyödyntää liiketoiminnallisesti sähkömarkkinoilla ja mitkä ovat sen keskeiset hyödyt ja haasteet.

Kyseisellä operaattorilla on useita tuhansia matkapuhelintukiasemia, joiden sähkönsyöttö täytyy varmistaa sähkönsyötön häiriötilanteiden varalta Liikenne- ja viestintäviraston määräyksellä. (*Traficom*, ei pvm.)

Tukiasemia voidaan ohjata automaattisesti tukiasemaohjaimilla joko yksittäin, erillisenä joukkona tai yhtenä kokonaisuutena. Näin ollen tukiasemien akustojen voidaan nähdä muodostavan hajautetun akkuenergiavaraston (Battery Energy Storage System, BESS) tai virtuaalisen voimalaitoksen (Virtual Power Plant, VPP).

Tutkimusasetelma on suunniteltu siten, että se mahdollistaa syvällisen ja monipuolisen aineiston keräämisen hajautetusta akkuenergiavarastosta ja sen liiketoiminnallisista hyödyistä.

3.2 Tutkimuksen reunaehdot ja tutkimuskysymys

Tutkimuksen reunaehdoiksi on asetettu seuraavat kohdat:

1. Tutkimuksessa keskitytään tutkimaan olemassa olevan infrastruktuurin hyödyntämistä
2. Viranomaismääräykset tulee ottaa huomioon eikä niitä saa rikkoa

Varsinainen tutkimuskysymys kuuluu: Mikä on liiketoiminnallisesti kannattavin tapa hyödyntää teleoperaattorin matkaviestinverkossa käytössä oleviin akkusähkövarastoihin varastoitua energiaa sähkömarkkinoilla tutkimuksen reunaehdot huomioiden?

3.3 Aineistonkeruumenetelmät

Aineistonkeruumenetelminä tässä tutkimuksessa käytetään puolistrukturoituja haastatteluja ja dokumenttianalyysiä. Haastattelut mahdollistavat syvällisen tiedon keräämisen tutkittavien kokemuksista ja näkemyksistä hajautetun akkusähkövaraston käytöstä ja hyödyistä (Anneli Sarajärvi & Jouni Tuomi, 2017). Dokumenttianalyysi tarjoaa tietoa akkusähkövaraston teknisistä ominaisuuksista

ja liiketoiminnallisista mahdollisuuksista sekä rajoitteista kuten varastoidusta energiamäärästä ja sähkönsyöttötehosta sekä viranomaismääräyksistä.

3.4 Aineiston analyysi

Kerätty aineisto analysoidaan sisällönanalyysin menetelmin, mitkä on kuvattu Sarajärven ja Tuomen toimittamassa teoksessa Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi (2017). Analyysissä keskitytään tunnistamaan keskeiset teemat ja ilmiöt, jotka liittyvät akkusähkövaraston liiketoiminnallisiin hyötyihin.

3.5 Eettiset näkökohdat

Eettiset näkökohdat huomioidaan erityisesti haastattelujen ja havainnoinnin osalta, ja tutkimukseen osallistuvilta henkilöiltä pyydetään suostumus aineiston keräämiseen ja käyttöön.

3.6 Liiketoiminnalliset hyödyt

Tutkimuksessa tarkastellaan myös hajautetun akkusähkövaraston liiketoiminnallisia hyötyjä. Vaikka kyseessä on tapaustutkimus eikä varsinainen kehittämistutkimus, pyritään tutkimuksen avulla saamaan tietoa liiketoiminnan kehittymisen mahdollistamiseksi. Ojasalo ja muut korostavat toimittamassaan kirjassa Kehittämistyön menetelmät (2014), että kehittämistutkimuksen tavoitteena on tuottaa konkreettisia ja käytännönläheisiä ratkaisuja, jotka parantavat liiketoiminnan kilpailukykyä ja tehokkuutta (Katri Ojasalo ym., 2014, s. 27) . Hajautetun akkusähkövaraston liiketoiminnallisia hyötyjä voivat olla muun muassa matkaviestinverkon varavirtalähteiden (UPS) kapasiteetin tarjoaminen sähkömarkkinalle, kun niitä ei tarvita matkaviestinverkon omiin tarpeisiin. Tämä muuttaa UPS-järjestelmät kustannuserästä tulonlähteeksi.

Liiketoiminta-analyysi voi tarjota syvällistä tietoa siitä, miten hajautettu akkusähkövarasto voi parantaa yrityksen liiketoimintaprosesseja ja kilpailukykyä.

Se auttaa myös tunnistamaan mahdolliset riskit ja kehitysalueet, mikä on tärkeää liiketoiminnan strategisessa suunnittelussa ja päätöksenteossa.

4 SÄHKÖMARKKINAT JA MARKKINAPAIKAT

Sähkömarkkinoilla sähkön tuottajien ja kuluttajien tarpeet kohtaavat. Sähköverkot mahdollistavat sähkömarkkinat, jolloin tuottajien sähköä voidaan välittää sähkön kuluttajille. Sähkömarkkinoilla varmistetaan yhteiskunnan sähköjärjestelmän toimivuus sekä tasapainotetaan sähkön kysyntä ja tarjonta. Markkinahinnoittelu vaikuttaa sähkön tuottajien ja kuluttajien päätöksiin lyhyellä ja pitkällä aikavälillä muiden muassa sähkön kulutuskäyttäytymisen ja investointien osalta. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-g)

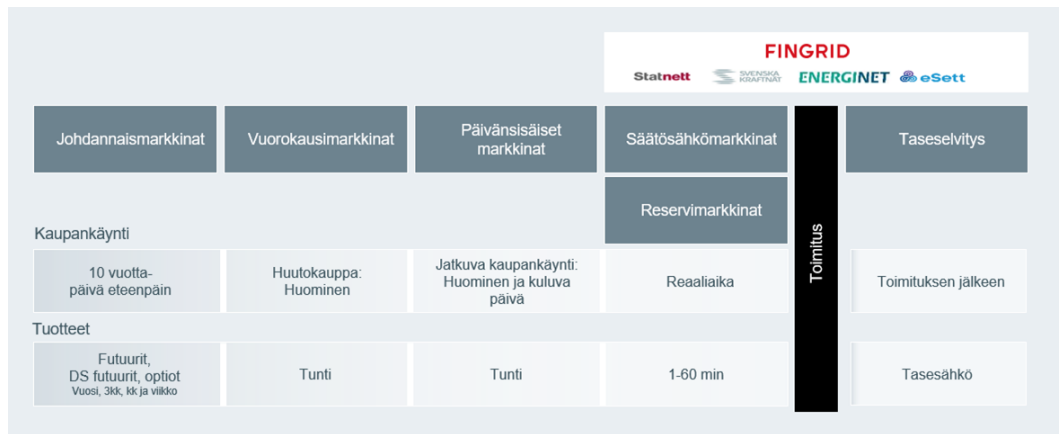
4.1 Sähkön hinnanmuodostus

Sähkön hinnanmuodostuksen tapahtuu kysynnän ja tarjonnan perusteella sähköpörssissä, joista pohjoismaissa toimivat Nord Pool Spot ja Epex. Sähköpörssit yhdistävät kysynnän ja tarjonnan perusteella hinnat ja näiden yhdistelmänä kullekin vuorokauden tunnille määräytyy yksi pörssihinta. (Fingridlehti, ei pvm.)

4.2 Sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat

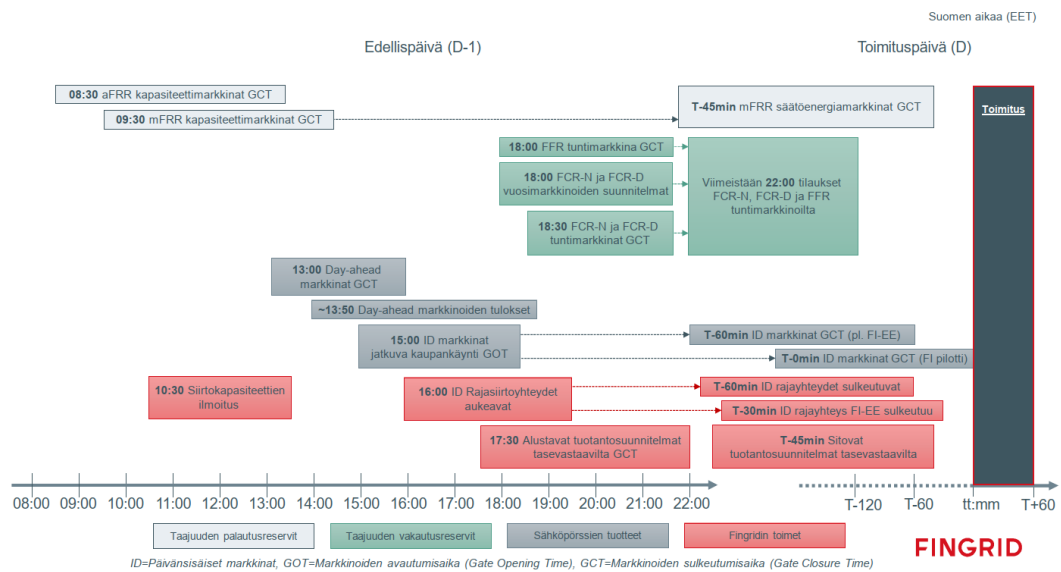
Sähkömarkkinoiden tehtävä on tarjota sähköä kaikille kuluttajille sekä tuottajille mahdollisuuden myydä tuottamaansa sähköä. Merkittävin markkinapaikka on yhteiseurooppalainen vuorokausimarkkina, joka yhdistää eri maiden vähittäismarkkinat isommaksi kokonaisuudeksi ja auttaa sähkömarkkinoiden tasapainottamisessa. Myyjät tarjoavat erilaisia sopimuksia kaikkien tarpeisiin. Lisäksi on olemassa johdannaismarkkinat, joilla voi käydä kauppaa useiden vuosienkin päähän. Lisäksi on olemassa päivänsisäiset markkinat ja reservimarkkinat. Fingrid on vastuussa Suomen sähköjärjestelmän tasapainosta. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-h)

Sähkön monipuoliset markkinat on kuvattu seuraavassa kuvassa.



Kuva 3. Sähköstä käydään kauppaa erilaisilla markkinapaikoilla. (Fingrid Oyj, ei pvm.-a)

Sähkömarkkinoiden aikataulut on esitelty alla olevassa kuvassa.



Kuva 4. Sähkömarkkinoilla tapahtuvat markkinatoimet toimituspäivänä ja sitä edeltävänä päivänä fyysisten tuotteiden osalta. Markkina-ajat esitetty Suomen ajassa (EET). (Fingrid Oyj, ei pvm.-b)

4.3 Sähkön johdannaismarkkinat

Sähkön johdannaismarkkinat ovat merkittävässä roolissa sähkömarkkinoilla. Fingrid on kuvannut sähkön johdannaismarkkinoita Internet-sivuillaan seuraavasti:

Sähkön johdannaismarkkinat tarjoavat välineitä sähkön hinnanvaihteluiden hallintaan. Markkinatoimijat, kuten tuottajat ja myyjät, käyttävät johdannaisia suojautuakseen hintariskiltä. Esimerkiksi tuottaja voi käyttää johdannaisia suojautuakseen alhaisilta hinnoilta, kun taas myyjä voi suojautua korkeilta hinnoilta kiinteähintaisten sopimusten varalta. Markkinoilla toimii myös spekulatiivisia sijoittajia, jotka eivät käsittele fyysistä sähköä, vaan kaupankäynti perustuu hintaodotuksiin. Johdannaisia voidaan käydä kauppaa pörseissä tai kahdenkeskisillä sopimuksilla, riippuen toimijoiden tarpeista. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-i)

4.4 Sähkön vuorokausimarkkinat

Sähkön vuorokausimarkkinoilla sähköenergiasta käydään kauppaa seuraavalle päivälle tunneittain.

Sähkön hinta määräytyy vuorokausimarkkinoilla, missä eri toimijat ennustavat sähkön tuotantoa ja kulutusta seuraavalle vuorokaudelle. Tuottajat jättävät tarjouksensa seuraavan päivän tuotannon osalta edellisenä päivän ennen kello 13 Suomen aikaa. Sähkön lopullinen hinta määräytyy perustuen annettuihin tarjouksiin eri vähittäismarkkinoita yhdistävien siirtolinjojen käytettävissä olevaan siirtokapasiteettiin. Siirtokapasiteetti auttaa hillitsemään hintaeroja eri vähittäismarkkinoiden välillä. Mikäli siirtokapasiteetti ei riitä tai sitä ei ole käytettävissä esimerkiksi kaapelirikkojen vuoksi, saattaa syntyä pullonkauloja, mitkä vaikuttavat sähkön hintoihin vähittäismarkkinoilla. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-j)

4.5 Sähkön päivänsisäiset markkinat

Koska johdannais- ja vuorokausimarkkinat perustuvat ennusteisiin ja todellinen tuotanto tai kulutus saattaa poiketa ennusteesta, tarvitaan markkinoilla myös päivänsisäiset markkinat sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi.

Tasapainottaminen toteutetaan päivänsisäisillä markkinoilla, missä hinnat määräytyvät jatkuvasti kaupankäynnin mukaan. Päivänsisäiset markkinat parantavat markkinadynamiikkaa ja hinnanmuodostuksen läpinäkyvyyttä toimitushetkellä. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-k)

4.6 Taseselvitys

Jotta kaikki tuottajat saavat osuutensa tulosta ja kaikki käyttäjät maksavat osuutensa kulutuksesta, tarvitaan taseselvitystä, joka huolehtii rahavirtojen liikkumisesta paitsi oikeille tahoille myös oikeassa suhteessa. Kaikki markkinatoimijat ovat vastuussa omasta sähkötaseestaan. Tämä tapahtuu varmistamalla, että tuotanto, hankinta, kulutus ja myynti ovat tasapainossa. Taseen tasapaino varmistetaan ulkoisen ja puolueettoman palveluntarjoajan toimesta. Markkinoilla on määritelty standardit eSett Oy:n taseselvityksen ja sekä Fingridin että tasevastaavan välisen sopimuksen osalta. Tasevastaavalle tarkoitetaan tahoja, jolla on sopimus Fingridin kanssa taseen tasapainottamisesta. Sopimukset Fingridin ja taseselvitys eSett Oy:n kanssa tarjoavat markkinatoimijalle taseen tasapainotuspalvelut ja taseselvitykseen liittyvät palvelut. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-l)

Energiavirasto on kuvannut taseselvityksen perusteella tapahtuvaa rahan liikkumista selkeästi ja ymmärrettävästi:

”Sähkönmyyjät eivät vastaa sähkön jakelusta, vaan myyvät sähköenergiaa, joka on syötetty sähköjärjestelmään. Myynti kirjataan sähkötaseisiin, ja myyjä laskuttaa asiakkaita mittaus tietojen ja myyntisopimusten mukaan. Taseselvityksen avulla voidaan selvittää, kuinka paljon energiaa on käytetty tai tuotettu ja kuka maksaa käytetyn energian. Sopimukset on oltava voimassa ennen toimituksen alkua, vaikka taseselvitys tehdään toimituksen jälkeen.” (*Energiavirasto*, ei pvm.)

5 SÄÄTÖSÄHKÖ- JA RESERVIMARKKINAT

Koska sähköjärjestelmän taajuuden tulee olla jatkuvasti 50Hz, tarvitaan markkinoilla säätösähköä ja sähköreservejä, joilla sähköjärjestelmän taajuutta ja sähkön laatua kyetään ylläpitämään jatkuvasti. Fingrid ja muut pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ylläpitävät säätöenergiamarkkinoita (mFRR, manual Frequency Restoration Reserves). Jokaisen maan tasevastaava varmistaa, että kyseisessä maassa on riittävästi kapasiteettia, jolla ylläpidetään sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainoa. Säätöreservitarjoukset tulee jättää vähintään 45 minuuttia ennen kyseisen tarjouksen kohteena olevaa tuntia. Tehotasapainon varmistamiseksi tarjouksia aktivoidaan tarpeen täyttämiseksi. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-m)

5.1 Reservimarkkinat

Reservimarkkinoiden rooli ja merkitys sähköjärjestelmälle on kiteytetty hyvin Fingridin toimesta. Sähköverkon taajuus kertoo kulutuksen ja tuotannon tasapainosta. Tasapainotilassa sähköverkon taajuus on 50,0 Hz. Reserveillä tarkoitetaan sähkön tuotantolaitoksia, käyttöpaikkoja ja monenlaisia energiavarastoja, mitkä voivat muuttaa joko tuotannon tai kulutuksen tehoa tarpeen mukaan. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-n)

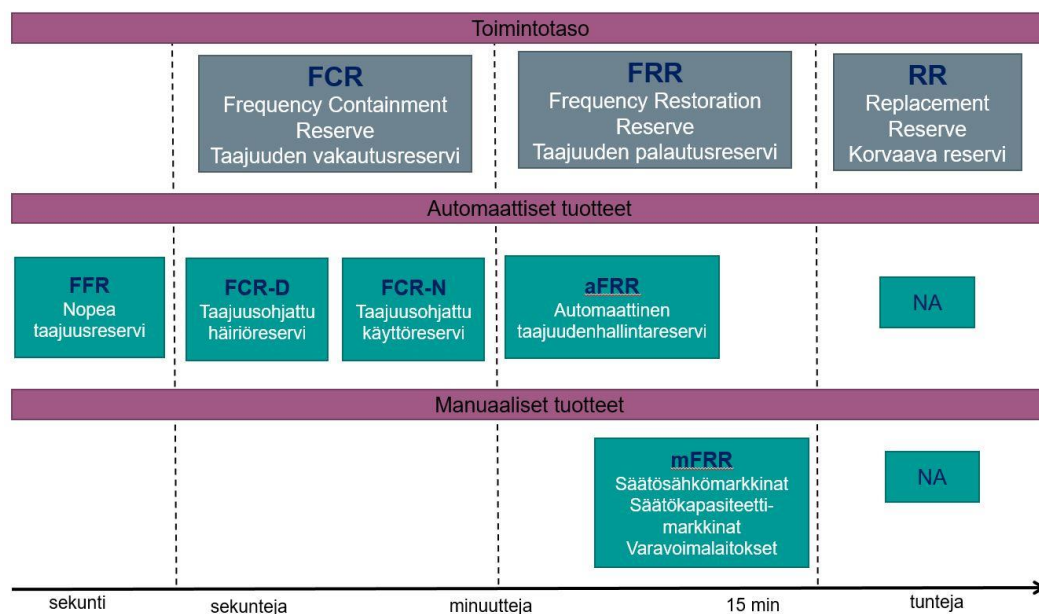
Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi meneillään oleva energiamurros fossiilisista energialähteistä uusiutuviin energiantuotantomuotoihin asettaa energiajärjestelmät kautta maailman merkittävään muutokseen. Tämä aiheuttaa haasteita energiajärjestelmien vakaudelle perinteisten joustavien tuotantolaitosten korvautuessa aurinko- ja tuulivoimalla. Lisäksi liikenteen sähköistyminen lisää huipputehon tarvetta, mikä vaatii älykästä hallintaa ja verkon vahvistamista. Nämä muutokset merkitsevät järjestelmän inertian eli liike-energian vähentymistä, mikä altistaa järjestelmät häiriöille. Reservimarkkinoiden on kehityttävä muutoksen mukana, jotta sähköjärjestelmien toimivuus kyetään varmistamaan.

Reservituotteita on erilaisia ja ne jaotellaan käyttötarkoituksensa perusteella kolmeen ryhmään:

1. Jatkuvaan taajuuden ylläpitämiseen käytetään taajuuden vakautusreservejä.
2. Taajuuden palauttamiseksi ja taajuuden vakautusreservien vapauttamiseksi käytetään taajuuden palautusreservejä.
3. Häiriötilanteiden jälkeisiin uusiin vikatilanteisiin voitaisiin valmistautua korvaavilla reserveillä. Korvaavia reservejä ei kuitenkaan käytetä ainakaan toistaiseksi pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä.

Pohjoismaissa on lisäksi ollut käytössä nopea taajuusreservi vuodesta 2020 alkaen. Taajuuden vakautusreservien lisäksi nopealla taajuusreservillä kyetään reagoimaan nopeasti taajuuden muutoksiin pienen inertian käyttötilanteissa. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-n)

Alla olevassa kuvassa on selkeä jäsentely markkinoilla olevista reservituotteista käyttötarkoituksensa perusteella.



Kuva 5. Reservituotteet esitettynä tuotteittain ja aktivointiaikoinen (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-c)

5.1.1 Nopea taajuusreservi (FFR)

Nopeaa taajuusreserviä tarvitaan erityisesti kesäaikoina, jolloin tuotantoa ja kulutusta on keskimääräistä vähemmän ja inertia on vähäistä. Inertialla tarkoitetaan liike-energiaa, mikä on varastoitunut voimalaitosten pyöriin massoihin ja näin vastustavat taajuuden muutosta. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-o)

5.1.2 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D)

Taajuuden muutos verkossa aktivoi automaattisesti toimivia reservejä, jotka on varattu käyttö- ja häiriöreserveiksi. Näitä reservejä käytetään jatkuvaksi ja ne muodostavat taajuuden vakautusreservin (Frequency Containment Reserve, FCR). (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-p)

5.1.3 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)

Sähköjärjestelmä muuttuu jatkuvasti ja markkinoille täytyy tuoda uusia tuotteita sähköjärjestelmän toiminnan varmistamiseksi. Yksi esimerkki uudesta tuotteesta on utomaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR), mikä otettiin käyttöön pohjoismaissa vuonna 2013. Automaattisella taajuuden palautusreservillä palautetaan taajuus nimellistaajuuteen ja tehotasapaino suunniteltuun arvoon. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-q)

5.1.4 Säättö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

Jotta riittävästi säätötehoa, olisi saatavilla, Fingrid maksaa reservitoimittajille korvausta säätötehon tarjoamisesta. Tällä varmistetaan sähköjärjestelmän toimivuus, käyttövarmuus ja tehotasapaino. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-r)

5.2 Reservimarkkinoille liittyminen

Reservimarkkinoille voi liittyä kuka tahansa, joka hallinnoi teknisesti ehdot täyttävää reservikykyä. Reservimarkkinoille liittyminen edellyttää lisäksi sopimusta Fingridin kanssa. Lisäksi reservipalveluita tuottavan kohteen on täytettävä markkinapaikan edellytykset ja tekniset vaatimukset. Mikäli yksittäinen kohde ei täytä yksinään edellytyksiä liittyä reservimarkkinoille, voidaan kohteita yhdistää eli aggregoida, jolloin kohteet yhdessä täyttävät liittymisen edellytykset ja tekniset vaatimukset. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-s)

Reservimarkkinoille voi liittyä myös aggregaattorin avulla, jolloin erillistä sopimusta Fingridin kanssa ei tehdä. Yksi tällainen saatavilla oleva vaihtoehto on Fortum Spring, joka tuottaa palvelua hajautettujen energiavarastojen liittämiseksi sähkömarkkinoille. (*Fortum Spring*, ei pvm.)

5.3 Kaupankäynti reservimarkkinoilla

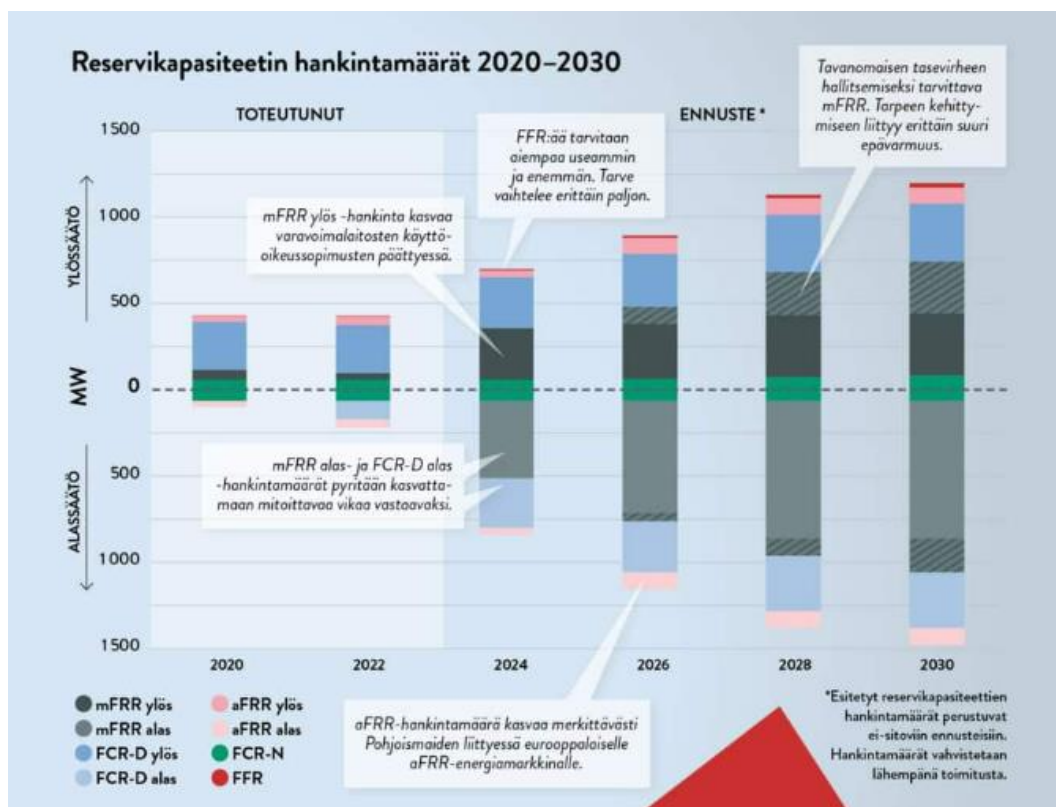
Jotta voi osallistua reservimarkkinoiden kaupankäyntiin, tulee olla liittynyt tarvittaviin järjestelmiin, missä kauppaa käydään, koska reservimarkkinoilla toimiminen edellyttää aktiivista viestintää reservitoimittajan ja Fingridin välillä. Tiedonvaihdon alustana toimii Vaksi-järjestelmä. Reservitoimittajat jättävät tarjouksensa Vaksi-järjestelmän kautta, missä hyväksytyt kaupat tallennetaan. Vaksi-järjestelmän avulla säätösähkömarkkinoiden reservien aktivoiminen on mahdollista. Raportointi toteutetaan FEN- tai KoVa-FEN -verkossa tai web-tiedonsiirron avulla ja on reaaliaikaista. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-t)

5.4 Ennuste reservimarkkinoiden kehitymisestä

Reservimarkkinoiden merkitys on menneiden vuosien aikana muuttunut entistä merkityksellisemmäksi, koska perinteisiä voimalaitoksia on poistettu verkosta päästöjen vähentämiseksi. Samaan aikaan erilaiset uusiutuvat energialähteet kuten tuuli- ja aurinkovoima ovat lisääntyneet.

Kasvavan trendin ennustetaan jatkuvan pitkälle tulevaisuuteen ja eräs ennuste tulevaisuuden kehityksestä on annettu Fingridlehdessä, missä ennakoidaan valtavaa kasvua reservien tarpeelle muiden muassa aurinko- ja tuulivoiman voimakkaan kasvun seurauksena. Tämä edellyttää myös aiempaa suurempaa säätötarvetta ja hetkittäiset tarpeet tullevat olemaan huomattavasti suurempia kuin on ennustettu. (*Fingridlehti*, ei pvm.-a)

Alla olevassa kuvassa on ennuste reservikapasiteetin hankintamääräksi vuosina 2020 – 2030.



Kuva 6. Ennusteen mukaan reservikapasiteetin tarve kasvaa 134% seuraavien 5 vuoden aikana. (*Fingridlehti*, ei pvm.-a)

5.5 Ansaintamallit

Jotta reservimarkkinat houkuttelisi riittävästi osallistujia, tulee tuottojen olla riittävän houkuttelevat toimijoiden osallistumiseksi. Fingrid on avannut

reservimarkkinoiden ansaintamalleja helpottaakseen osallistuvien tahojen tuottoennusteiden laskemista:

”Reservimarkkinoiden vuosituotto voidaan lasketaan yksinkertaisella kaavalla: Vuosituotto (€) = kauppojen mukainen hyväksytyt reservikapasiteetti (MW) × ka-hinta (€/MW,h) × pysyvyys (h). Tässä oletuksena on, että kaikki jätetyt tarjoukset tulevat hyväksytyksi. Keskiarvohintana laskennassa käytetään volyymipainotettua keskihintaa, joka lasketaan tuntihinnoista hankintamäärällä painottaen.” (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-u)

Merkittävä muuttuja tuottojen osalta on pysyvyys, joka voi vaihdella 0 ja 8760 tunnin välillä vuodessa. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-u)

Fingridin mukaan (E. Konttila, henkilökohtainen viestintä, 8. huhtikuuta 2024) reservimarkkinoille pyrkivien tahojen määrää tai reservikapasiteettia ei rajoiteta, vaan reservimarkkinoille voivat liittyä kaikki tahot, jotka täyttävät reservimarkkinoille liittymiselle asetetut vaatimukset. Tämä voi lisätä kilpailua markkinoilla merkittävästi, mikäli reservien tarve jatkaa kasvuaan ja reservimarkkinoilta on saatavilla riittävää tuottoa investoinneille.

6 SÄHKÖVERKKOON LIITTYMINEN JA SÄHKÖVARASTOJEN VAATIMUKSET

6.1 Liittyminen sähköverkkoon

Sähköverkkoon liittyminen edellytykset on määritelty Fingridin toimesta. Verkonhaltijan velvollisuus on liittää tekniset vaatimukset täyttävät sähköntuotantolaitokset ja sähkönkäyttöpaikat verkkoonsa. Asiakkaan velvollisuus on huolehtia, että heidän ja heidän kumppaneidensa laitteistot ja sähköverkot täyttävät järjestelmätekniset vaatimukset sekä yleiset liittymisehdot. (Fingrid Oyj, ei pvm.-v)

Se, liittykö käyttö- tai tuotantopaikka kanta- vai jakeluverkkoon, riippuu tehtasosta. Pienitehoiset liitynnät liitetään ensisijaisesti jakeluverkkoon. Jakeluverkonhaltijoista ylläpidetty lista on Energiavirastolla. (Fingrid Oyj, ei pvm.-v)

6.2 Sähkövarastojen tekniset vaatimukset

Sähkövarastoille on määritelty Fingridin toimesta neljä erillistä tyyppiluokkaa teknisten vaatimusten osalta. Sähkövaraston tuotantotehon on oltava vähintään 0,8kW. (Fingrid Oyj, ei pvm.-w)

Jännite- ja mitoitustehon perusteella tyyppiluokitellut sähkövarastot kuvattu seuraavassa kuvassa.

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

Kuva 7. Sähkövaraston tyyppiluokittelu tuotantotilan mitoitusasteen ja liittymispisteen jännitetaso perusteella. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-d)

Tarkemmat voimassaolevat tekniset vaatimukset sähkövarastojen verkkoon liittämiseksi löytyvät Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset SJV2019 -dokumentista. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-d)

Sähkövarastojen järjestelmätekniisistä vaatimuksista on luonnosteltavana uudistettu versio Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset SJV2024, jonka on määrä tulla voimaan vuoden 2025 aikana. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-x)

7 TUTKIMUSKOHTTEEN ENERGIAVARASTON OMINAISUUDET

Tämän opinnäytetyön kaikki matkaviestinverkkoa kuvaavat numeeriset tiedot ja luvut ovat esimerkinomaisia. Työnantajan pyynnöstä tarkkoja lukuja ei ole käytetty ja esitetyt arvot ovat tarkoitettu ainoastaan havainnollistamaan tutkimuksen menetelmiä ja tuloksia.

7.1 Matkaviestinverkosta lyhyesti

Matkaviestinverkko mahdollistaa langattoman viestinnän laitteiden välillä. Matkaviestinverkon keskeisiä osia ovat tukiasemat, jotka toimivat välittäjinä mobiililaitteiden ja verkon muiden osien välillä. Matkaviestinverkko koostuu soluista, joista jokainen kattaa tietyn maantieteellisen alueen. Solun keskipisteessä on tukiasema, joka vastaanottaa ja lähettää signaaleja matkapuhelimille. Tukiasemat ovat yhteydessä toisiinsa ja verkon ydinosiin ja sitä kautta myös Internetiin. Tukiasemien ensisijainen tehtävä on ylläpitää yhteyttä mobiililaitteiden ja verkon välillä. Ne vastaanottavat langattomia signaaleja, vahvistavat niitä ja lähettävät eteenpäin. Tukiasemat hallinnoivat myös verkkoyhteyksiä, varmistavat yhteyksien laadun ja huolehtivat siitä, että tiedonsiirto on sujuvaa ja tehokasta.

Tukiaseman pääkomponentteja ovat mm. radiolähetin ja -vastaanotin, antennijärjestelmä, tukiasemaohjainjärjestelmä ja virtalähde. Suomessa tukiasemien sähkönsyöttö täytyy varmistaa sähkönsyötön häiriötilanteiden varalta Liikenne- ja viestintäviraston määräyksellä. (*Traficom*, ei pvm.)

7.2 Tukiasemien määrän arviointia

Tässä kappaleessa esitetyt luvut ovat esimerkinomaisia, jotta salassa pidettävät tiedot eivät paljastu. Lukuja ja arvoja valitessa on hyödynnetty olemassa olevaa dataa, joten luvut sinänsä voisivat pitää paikkansa, joten laskelmien sovittaminen reaali maailman sovellukseen on helppoa muuttamalla lähtöarvoja.

Tukiasemien peittoalueet vaihtelevat useiden tekijöiden, kuten taajuuden, ympäristön ja tukiaseman tehojen mukaan. Haja-asutusalueilla tukiasemat voivat kattaa maaseudulla jopa 10-15 kilometrin säteellä, kun taas kaupunkialueilla peittoalue on yleensä pienempi, noin 1-3 kilometriä, johtuen korkeammasta käyttäjämäärästä ja rakennusten aiheuttamista esteistä. 5G-verkon tukiasemien peittoalue korkeilla taajuuksilla erityisen vilkkailla alueilla voi olla vain joidenkin satojen metrien luokkaa.

Suomen mittakaavassa tukiasemia tarvitaan määrällisesti paljon, jotta saavutetaan sekä riittävä maantieteellinen peitto että pystytään kattamaan tiheimmin asuttujen alueiden kapasiteetin tarve. Oletetaan, että operaattorilla on 10000 kappaletta tukiasemia, jotka ovat varustettu tarvittavilla komponenteilla mukaan lukein sähkönsyötön varmistavalla akustolla ja ovat siten liitettävissä helposti sähkön reservimarkkinoille.

7.3 Tukiasemien akustojen tekniset ominaisuudet

Perinteisesti operaattorit ovat hyödyntäneet mobiilitukiasemien UPS-laitteissa lyijyakkuja niiden alhaisten elinkaarikustannusten vuoksi. (Hoff, 2022, s. 153) Akustot ovat olleet pakollinen kuluerä, joten akustoihin ei ole ollut järkevää investoida enemmän kuin on ollut tarpeen. Oletetaan, että tutkimuksen kohteena olevassa matkaviestinverkossa käytetyt akustot ovat lyijyakkuja ja perehdytään niiden ominaisuuksiin.

Lyijyakun lataus- ja purkausprosessit perustuvat kemiallisiin reaktioihin. Latauksen aikana elektronit pakotetaan negatiiviseen napaan, mikä vapauttaa sulfaatti-ioneja ja muuttaa lyijysulfaatin lyijyksi. Positiivisessa navassa lyijysulfaatti hajoaa lyijydioksidiksi ja vapauttaa ioneja elektrolyyttiin, joka muuttuu väkevämmäksi rikkihapoksi. Purkauksen aikana sulfaatti-ionit reagoivat lyijyn ja lyijydioksidin kanssa muodostaen lyijysulfaattia. Lyijyakku voi tuottaa suuria tehoja lyhyeksi ajaksi, mutta pitkäkestoisessa käytössä reaktiot hidastuvat, mikä johtaa jännitehäviöön. Levon aikana ionit tasapainottuvat uudelleen, mikä palauttaa

akun tehon. Kylmässä elektrolyytti muuttuu jähmeämmäksi, hidastaen ionien liikettä. Lyijyakun lataaminen on myös hidasta ja akku tulee pyrkiä lataamaan käytön jälkeen täyteen akun elinkaaren maksimoimiseksi. (Hoff, 2022, s. 154 - 155)

Tyypillinen lyijyaku, jota voitaisiin käyttää mobiilitukiaseman akustona, on esimerkiksi Marathon M12V100FT. Valmistaja lupaa akustolle 15 vuoden käytettävyytakuun 20 celsius-asteen lämpötilassa ennen kuin varauskapasiteetti on laskenut alle 80% alkuperäisestä. Akustot ovat myös täysin kierrätettäviä, mikä on tärkeää kestävän kehityksen ja ilmastonmuutoksen vaikutusten minimoinnin kannalta. Tarkemmat tekniset ominaisuudet on esitetty alla olevassa kuvassa. (Marathon M FT, ei pvm.)

TECHNICAL CHARACTERISTICS AND DATA

Nominal voltage	12 V	Terminal	F-M6-90°
Float charge	2,29 V/C @ 20 °C	Terminal Torque	11 Nm
Capacity	CP 10min 1,6V/C 20°C 3000W/Bloc CC 10h 1,8V/C 20°C 100Ah	Container	UL 94-HB (Polypropylene)
Short circuit current	2445 A (IEC60896-21/22)	Temperature range	-40°C to 55°C
Internal resistance	5 mΩ (IEC60896-21/22)	Dimensions (l x b/w x h)	105 x 395 x 287 mm
		Weight	33 kg
		Origin	Castanheira, Portugal

CONSTANT POWER DISCHARGE

W @ 20 °C	3m	5m	10m	15m	30m	1h	90m	2h	150m	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	12h	24h
1,940 V/C	1450	1450	1450	1450	1035	670	469	385	327	270	209	172	146	127	115	104	93,5	79,5	41,2
1,920 V/C	1500	1500	1500	1500	1100	700	490	408	346	285	220	180	153	133	120	108	98	83,3	43,1
1,900 V/C	1670	1670	1670	1670	1186	740	518	430	365	300	231	189	161	140	126	113	103	87,5	45,3
1,870 V/C	1790	1790	1790	1790	1251	770	539	447	378	310	240	195	166	144	130	117	106	90,4	46,8
1,850 V/C	3100	2800	2220	1880	1295	790	553	455	387	320	246	201	171	149	134	120	109	92,6	47,9
1,830 V/C	3300	2980	2350	1960	1329	800	560	465	396	328	253	207	176	153	137	123	112	95,2	49,3
1,800 V/C	3622	3225	2459	2011	1355	815	570	473	404	334	258	210	179	155	140	126	114	96,9	50,2
1,780 V/C	3778	3356	2569	2100	1380	825	578	479	408	338	261	212	180	157	142	128	116	98,6	51,1
1,750 V/C	3948	3498	2689	2153	1400	835	585	485	414	342	264	215	183	159	144	130	117	99,5	51,5
1,730 V/C	4154	3662	2770	2219	1425	845	591	488	417	345	267	218	185	161	145	131	119	101	52,1
1,700 V/C	4372	3830	2830	2250	1434	855	599	495	423	350	271	221	188	163	146	132	120	102	52,6
1,670 V/C	4646	4012	2890	2280	1444	860	602	499	427	355	275	224	190	166	148	133	120	102	53
1,650 V/C	4925	4154	2950	2310	1449	865	606	502	431	359	278	227	193	168	150	135	122	104	53,7
1,600 V/C	5200	4300	3000	2345	1452	870	609	505	435	364	282	230	195	170	151	136	123	104	54

Kuva 8. Marathon M FT / M12V100FT akuston purkutehot eri tyhjennussyvyyksin. (Marathon M FT / M12V100FT, ei pvm.)

7.4 Tukiasemien akustojen energiavaraston ja tehontuoton arviointia

Mikäli tutkittavassa matkaviestinverkossa on 10000 akustoa, joiden kunkin kapasiteetti on 100Ah 20 celsius-asteen lämpötilassa, pystytään hajautetun energiavaraston kokonaiskapasiteetti laskemaan.

Yhden akun kapasiteetti: 100 Ah (ampeirituntia)

Akkumäärä: 10000 kpl

Kokonaiskapasiteetti = Yhden akun kapasiteetti × Akkumäärä

Kokonaiskapasiteetti = 100 Ah × 10000 = 1000000 Ah

Energiavarastoista puhuttaessa kokonaiskapasiteettina käytetään tavallisesti megawattitunteja MWh, joten ampeiritunnit on muutettava megawattitunneiksi. Muunnos onnistuu seuraavalla kaavalla. (Hoff, 2022, s. 148)

*$E = \text{Nimellisjännite (V)} * \text{kapasiteetti (Ah)}$*

*$E = 12V * 1000000 \text{ Ah} = 12000000 \text{ Wh}$*

$E = 12 \text{ MWh}$

Akustot pystyvät siis varastoimaan energiaa 12 MWh, mikä ei ole kovin suuri määrä energiavarastolle ja tulee vaikuttamaan merkittävästi sähkömarkkinoilta saatavilla olevaan tuottoon.

Lasketaan seuraavaksi tutkittavana olevan energiavaraston tehontuotto. Kuten kappaleessa 8.3 totesimme ”Lyijyakku voi tuottaa suuria tehoja lyhyeksi ajaksi, mutta pitkäkestoisessa käytössä reaktiot hidastuvat, mikä johtaa jännitehäviöön”.

Kuviosta x voimme havaita, että yksittäisen akun maksimitehontuotto on 3000W 20 asteen lämpötilassa täydestä tyhjään purettaessa. Maksimitehoa pystytään tuottamaan 10 minuutin ajan.

Energiavaraston kokonaisteho pystytään laskemaan seuraavasti:

*$P = 3000W * 10000kpl = 30000000W = 30MW$*

Vaikka energiavaraston kapasiteetti ei olekaan kovin merkittävän kokoinen, tehontuotto on kuitenkin merkittävää kokoluokkaa, mikä mahdollistaa energiavaraston hyödyntämisen sähkömarkkinoilla. Seuraavassa kappaleessa perehdyimme tutkimaan, mikä markkina olisi tutkittavalle energiavarastolle optimaalisin ottaen huomioon tutkimuskysymykset ja tutkimuksen reunaehdot.

7.5 Energiavaraston hyödyntäminen sähkömarkkinoilla

Liikenne- ja viestintäviraston määräyksen mukaan matkaviestinverkon yleinen varateholähteen varmistusaika on 3 tuntia, mikä tulee ottaa huomioon energiavaraston hyödyntämisessä. (Traficom - Määräys viestintäverkkojen ja -palvelujen varmistamisesta sekä viestintäverkkojen synkronoinnista, 2020)

Matkaviestinverkon akustot ovat mitoitettu kustannusten ja tilankäytön optimoimiseksi siten, että edellä mainittu Liikenne- ja viestintäviraston määräys kyetään täyttämään. Mitoitus tulee rajoittamaan akustojen käyttämistä sähkömarkkinoilla, koska ylimääräistä kapasiteettia ei ole hyödynnettäväksi. Näin ollen energiavarastoa kyetään käyttämään suurella teholla vain lyhytaikaisesti, mikä käytännössä rajaa sähkön vuorokausimarkkinat hyödynnettävyyden ulkopuolelle.

Energiavarastoa voidaan sen sijaan hyödyntää sähkön reservimarkkinoilla, mitkä tarjoavat mahdollisuuden tarjota vähintään 1MW tehoa lyhytaikaiseen sähköverkon taajuudensäätöreserviin. Kuten kuvasta 1 voimme havaita, mahdollisia käyttökohteita voisi olla seuraavat reservituotteet:

- *Nopea taajuusreservi, FFR*
- *Taajuusohjattu häiriöreservi, FCR-D*
- *Taajuusohjattu käyttöreservi, FCR-N*

Tutkitaan näiden tuotteiden vaatimuksia tarkemmin, jotta saamme selville mitkä tuotteet ovat mahdollisia hyödyntää tutkittavalla energiavarastolla.

7.5.1 Nopea taajuusreservi FFR

Nopea taajuusreservi otettiin käyttöön Pohjoismaissa toukokuussa 2020. Fingrid hankkii reserviä kansallisilta markkinoilta. Reservitoimittaja voi osallistua markkinoille tehtyään FFR-markkinasopimuksen ja läpäistyään säätökokeen. Aktivointi perustuu paikalliseen automaattiseen säätöön ilman Fingridin ohjaussignaaleja. Reservikohteella tulee olla säädin, joka ohjaa tehoa taajuusmittauksen perusteella. Reserviteho on aktivoitava täysimääräisesti, kun taajuus alittaa tietyn arvon. Aktivointiajat vaihtelevat 0,7 sekunnista 1,3 sekuntiin riippuen aktivointitaajuudesta. Aktivoinnin vähimmäiskesto on 5 sekuntia ja maksimikesto 30 sekuntia. Lisäksi reservikohteen tulee kytetä uuteen aktivointiin 15 min kuluessa edellisestä aktivoinnista. Reservikohteen minimiteho on 1MW. (Fingrid Oyj, ei pvm.-y)

Yhden aktivoinnin aikana akustojen kapasiteetista purkautuva varaus kyetään laskemaan seuraavasti

$$P = U * I \rightarrow I = P / U$$

$$I = 3000W / 12V * 30 / 3600 = 2,0833Ah$$

Yhden akun kapasiteetti: 100 Ah (ampeeerituntia)

$$Purettu varaus = 2,0833Ah / 100 Ah = 0,02083 = 2,083\%$$

Mahdollisen aktivoinnin yhteydessä akustojen varauksesta käytetään 3kW teholla vain pieni osa. Voimme todeta, että akustoja voidaan hyödyntää nopean taajuusreservin markkinoilla annettujen reunaehtojen ja viranomaismääräysten puitteissa.

7.5.2 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi

Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) ovat automaattisesti aktivoituvia pätötehoreservejä, joita käytetään taajuuden

hallintaan. FCR-N pyrkii pitämään taajuuden välillä 49,9–50,1 Hz, kun taas FCR-D pyrkii pitämään taajuuden vähintään 49,5 Hz:ssä tai enintään 50,5 Hz:ssä. FCR-N on symmetrinen tuote, joka pystyy sekä ylös- että alassäätöön, kun taas FCR-D on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin. Ylössäädöllä tarkoitetaan sähkön tuotannon lisäämistä tai kulutuksen vähentämistä. Vastaavasti alassäädöllä tarkoitetaan sähkön tuotannon vähentämistä tai kulutuksen lisäämistä. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-z)

Tutkittavana oleva akustomme käyttötarkoitus on täyttää viestintäverkkojen sähkönsyötöstä annettu määräys ja siten akustojen lataustason on oltava jatkuvasti hyvä. Täten voimme havaita, että akustoa ei voida hyödyntää Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) markkinoilla, koska kyseessä on symmetrinen tuote ja osallistuakseen kyseisille markkinoille, tulisi akuston pystyä tarvittaessa myös lisäämään kulutusta ja tähän täyteen tai lähes täyteen ladattu akustomme ei sovellu.

Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) sen sijaan on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin. Ylössäädöllä tarkoitetaan sähkön tuotannon lisäämistä, joten teoriassa akustomme voisi soveltua nopean taajuusreservin (FFR) lisäksi myös taajuusohjatun häiriöreservin ylössäätömarkkinoille (FCR-D).

Euroopan Komission sähköjärjestelmän käyttöä koskevassa asetuksessa määritellään taajuuden vakausreservin (FCR) ylläpitoon tarjottavien reservikohteiden hyväksyttämisen prosessi sekä reservikohteita koskevien teknisten vaatimusten todentaminen. Asetuksessa määritellään reservikohteelle asetetut vaatimukset FCR-markkinoille osallistuakseen ja mm. kestävyystestin yhteydessä tehontuottoa on jatkettava 15 minuutin ajan. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-ac)

Koska energiavarastomme päätehtävä on täyttää viestintäverkkojen sähkönsyötöstä annettu määräys ja siten akustojen lataustason on oltava jatkuvasti hyvä. Maksimaalinen tehontuotto on mahdollista käytettävillä akustoilla korkeintaan 10 minuutin ajan ennen akun tyhjentymistä, joten

taajuusohjattu häiriöreservi ei ole energiavarastollemme soveltuva markkina, koska jatkuvan tehontuoton minimivaatimus 15 minuutin yhtäjaksoisesta tehontuotosta ei ole mahdollista.

7.5.3 Energiavaraston käyttötapaukset

Tutkimuksen kohteena olevan energiavaraston hyödyntämisessä sähkömarkkinoilla on joitakin potentiaalisia käyttötapauksia, jotka voivat tuoda merkittäviä liiketoiminnallisia hyötyjä. Alla on esitelty energiavaraston keskeisimmät käyttötapauksia:

1. Varavoiman tarjoaminen: Matkaviestinverkon tukiasemien akustot voivat toimia varavoimana sähkökatkosten aikana. Tämä varmistaa, että matkaviestinverkko pysyy toiminnassa kriittisissä tilanteissa, kuten luonnonkatastrofien tai muiden häiriöiden aikana.
2. Taajuuden säätely: Tukiasemien akustot voivat osallistua sähköverkon taajuuden säätelyyn tarjoamalla nopeaa taajuusreserviä (FFR). Tämä auttaa ylläpitämään sähköverkon tasapainoa ja varmistaa, että sähköntuotanto ja -kulutus ovat jatkuvasti tasapainossa. Taajuuden säätelyyn osallistuminen voi tuoda merkittäviä tuloja reservimarkkinoilta.

8 TUTKIMUSKOHTTEEN LIIKETOIMINNALLISEN HYÖDYN ARVIOINTIA

Nopean taajuusreservin markkina (FFR) on ainoa markkina, mihin tutkittavana oleva sähkövarastomme soveltuu. Jotta voimme paremmin arvioida saatavilla olevaa liiketoiminnallista hyötyä, tulee perehtyä tarkemmin reservimarkkinoiden nopean taajuusreservin (FFR) hankinta- ja ansaintamalleihin.

8.1 Nopean taajuusreservin (FFR) hankinta- ja ansaintamallit

Nopean taajuusreservin hankintatarve riippuu sähköjärjestelmän inertiasta ja vaihtelee tunneittain. Tarve painottuu kevät-, kesä- ja syyskuukausina, jolloin inertia on pienimmillään. Fingrid julkaisee viikoittain hankintaennusteen. Reservi hankitaan kansalliselta tuntimarkkinalta, jossa tarjoukset jätetään edellisiltana. Hinta määräytyy kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-aa)

Energiavaraston vuosituottoa voi arvioida seuraavalla yksinkertaisella laskentakaavalla:

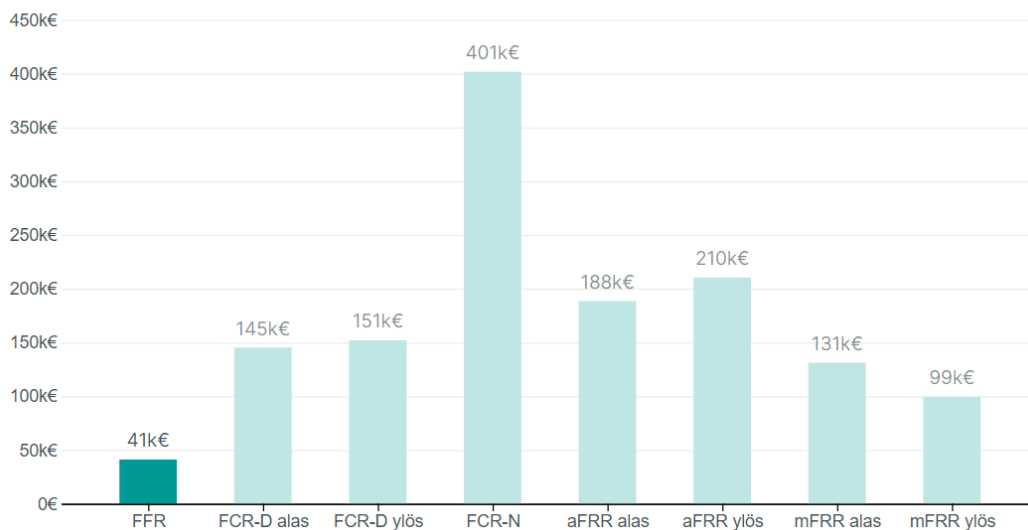
$$\text{Vuosituotto (€)} = \text{kauppojen mukainen hyväksytyt reservikapasiteetti (MW)} \\ \times \text{ka-hinta (€/MW,h)} \times \text{pysyvyys (h)}$$

Oletuksena on, että kaikki jätetyt tarjoukset tulevat hyväksytyksi. (*Fingrid Oyj*, ei pvm.-ab)

8.2 Vuosittaisen bruttotuoton arviointi reservituottolaskurin avulla

Vuosittaista bruttotuottoa voimme arvioida kahdella eri tavalla. Fingrid julkaisee nettisivuillaan Reservituottolaskuria, jolla voimme nopeasti nähdä potentiaalisen vuosituoton 1 MW reserviteholle eri reservimarkkinoilla. Alla olevassa kuvassa esitetty Reservituottolaskurin perusteella laskettu vuosituotto 1MW reserville. Nopean taajuusreservin tuotto korostettuna.

Potentiaaliset tuotot viimeisin vuosi 1 MW reservikyvyllä



Kuva 9. Fingridin reservituottolaskurin mukainen vuosituotto eri reservilajeille vuoden 2024 aikana. Nopean taajuusreservin tuotto korostettuna. (Fingrid Oyj, ei pvm.-e)

Koska tutkimamme energiavarasto pystyy turvallisesti tarjoamaan 30MW reservikapasiteettiä lyhytaikaisesti nopean taajuusreservin markkinalle, voimme laskea potentiaalisen vuosituoton.

$$\text{Vuosituotto} = \text{Reserviteho} * \text{Tuotto}/1\text{MW}$$

$$\text{Vuosituotto} = 30 \text{ MW} * 41\text{k€}/1\text{MW} = 1230\text{k€} = 1,23 \text{ M€}$$

Laskelma osoittaa, että reservimarkkinoilta on mahdollista saada merkittävää tuottoa olemassa olevia akustoja hyödyntämällä.

Tutkitaan lisäksi keskimääräistä vuosituottoa historiadatan perusteella niin monelta vuodelta kuin reservituottolaskurista löytyy dataa takautuvasti.

Taulukko 1. Vuosittainen potentiaalinen reservituotto 1MW reservikykyä kohti (Fingrid Oyj, ei pvm.-f)

Vuosi	Reservituotto/1MW, FFR
2020	154k€
2021	105k€
2022	43k€
2023	39k€
2024	41k€

Taulukosta voimme havaita, että reservituotto nopean taajuusreservin osalta viimeisten vuosien aikana on vakiintunut noin 40k€:n yhtä megawattia kohti. Näin ollen aiemmin laskemamme teoreettinen vuosituotto pitää hyvin paikkansa.

8.3 Vuosittaisen bruttotuoton arviointi avoimen datan avulla

Toinen ja huomattavasti todenmukaisempi tapa arvioida vuosittaista bruttotuottoa, on hyödyntää Fingridin tarjoamaa avointa dataa. Avointa dataa on saatavilla takautuvasti toteutuneiden hankinta- ja tarjousmäärien ja hintojen osalta, joita voimme hyödyntää laskettaessa bruttotuottoa.

Tutkin Fingridin avoimen datan avulla nopean taajuusreservimarkkinan toteutuneita hankinta- ja tarjousmääriä sekä toteutuneita hankintahintoja vuosien 2022 – 2024 ajalta. Nopean taajuusreservin markkina on stabiloitunut viimeisen kolmen vuoden aikana, joten kyseisen ajankohdan toteutuneita kauppvoja tutkimalla on mahdollista saada hyvä ennuste tulevaisuuden mahdollisista tuotoista.

Vuonna 2022 nopeaa taajuusreserviä hankittiin yhteensä 1504 tunnille vuoden aikana. Vuonna 2023 nopeaa taajuusreserviä hankittiin yhteensä 1032 tunnille vuoden aikana. Vuonna 2024 nopeaa taajuusreserviä hankittiin yhteensä 1966

tunnille vuoden aikana. Vuosien 2022 – 2024 aikana nopeaa taajuusreserviä hankittiin Fingrid Oyj:n toimesta keskimäärin 1500,67 tunnille vuodessa.

Vuosien 2022 – 2024 aikana nopean taajuusreservin keskimääräinen hankintateho oli 15,43MW ja keskimääräinen hankintahinta 30,74€/MW.

Nopean taajuusreservin vuosittaisen markkinan koko Suomessa saadaan laskemalla edellä mainittujen arvojen avulla hyödyntämällä aiemmin esiteltyä kaavaa:

Markkinan koko (€) = kauppojen mukainen hyväksytty reservikapasiteetti (MW) × ka-hinta (€/MW,h) × pysyvyys (h)

*Markkinan koko (€) = 15,43MW * 30,74€/MW,h * 1500,67h = 711477,3 €*

Koska tutkittavana olevan energiavaraston tehontuottokyky on jopa 30MW ja keskimääräinen hankintateho on 15,43MW, on selvää, että edellisessä kappaleessa laskettu teoreettinen tuotto ei ole mahdollinen, koska nopean taajuusreservin markkinan koko ei ole tällä hetkellä riittävän suuri kaiken käytettävissä olevan tehon hyödyntämiseksi.

Tutkittavana olevalla energiavarastolla lienee mahdollista saavuttaa parhaimmillaankin vain noin 20% markkinaosuus romahduttamatta hintaa, koska markkinalla on olemassa useita muita toimijoita.

Realistinen vuosittainen bruttotuotto nopean taajuusreservin markkinalta 20% markkinaosuudella voidaan laskea seuraavasti:

*Vuosituotto (€) = markkinan koko (€) * osuus markkinasta*

*Vuosituotto (€) = 711477,3€ * 20% = 142295,46€*

Tutkittavana olevalla energiavarastolla on mahdollista saavuttaa noin 140k€ vuosittainen bruttotuotto nopean taajuusreservin markkinalta.

8.4 Vuosittaiset operatiiviset kulut

Tuottojen saaminen edellyttää aktiivista osallistumista markkinoille esimerkiksi tarjousten jättämisen osalta sekä reservien aktivoimiseksi, tulee kannattavuutta arvioidessa ottaa huomioon tulojen saamisen edellyttämät operatiiviset kulut.

Koska vuosittaisen markkinan koko on kohtuullisen pieni vain hieman yli 700k€ ja tutkittavana olevalla energiavarastolla mahdollisuus saavuttaa parhaimmillaankin vain noin 20% osuus markkinasta, on suuri mahdollisuus, että tuotot eivät riitä operatiivisten kulujen kattamiseksi, jolloin toiminta ei olisi kannattavaa. Tutkin seuraavaksi kustannuksia, joita syntyy reservimarkkinoille liittymisestä ja markkinoilla aktiivisesti toimimisesta.

8.4.1 Reservimarkkinalle liittymisen kustannukset

Kuten aiemmin olemme todenneet, tutkittavana oleva energiavarasto on tarvittavine komponentteineen ja liittymineen jo olemassa, joten varsinaisia investointeja ei tarvita. Markkinoille liittymisestä aiheutuu kuitenkin myös muita kustannuksia kuin energiavarastoon liittyvät investoinnit. Investointien lisäksi kustannuksia syntyy säätökokeista, jotka on läpäistävä ennen kuin voidaan osallistua markkinoille. Oletamme, että säätökokeet pystytään toteuttamaan olemassa olevilla asiantuntijaresursseilla, joten ylimääräisiä perustamiskuluja ei niidenkään osalta synny.

8.4.2 Reservimarkkinoilla toimimisen kustannukset

Koska tutkimuksen kohteena oleva energiavarasto on hajautettu eli akustot sijaitsevat maantieteellisesti hyvin hajallaan eripuolilla Suomea ja nopean taajuusreservin markkinan reagointiaika vaihtelee 0,7 – 1,3 sekunnin välillä, täytyy akustoja kyetä ohjaamaan ohjelmallisesti.

Käytännössä on kaksi eri vaihtoehtoa ohjelmiston käyttöönottamiseksi:

1. Kehitettävä oma ohjelmisto, mikä vastaa käytännön tarpeita
2. Ostettava valmis ohjelmisto ulkoiselta toimijalta

Koska ohjelmistokehitys on kallista ja aikaa vievää sekä vaatii jatkuvaa ylläpitoa, ei reservimarkkinoilta ennustettavissa oleva tuotto mahdollista oman ohjelmiston kehittämistä. Tutkin löytyykö markkinoilta valmista ohjelmistoa, mikä mahdollistaisi energiavaraston hyödyntämisen markkinoilla.

Koska kyseessä on pohjoismainen operaattori, jolle verkon ja asiakkaiden tietoturva on ensiarvoisen tärkeää, käytettävät tukiasemat ovat suomalaisen Nokia Oyj:n valmistamia. Nokia toi markkinoille keväällä 2024 operaattoreille suunnatun palvelun Nokia Virtual Power Plant, mikä mahdollistaa tukiasemien varavirta-akustojen hyödyntämisen sähkömarkkinoilla, myös nopean taajuusreservin markkinalla. (*Nokia Oyj*, ei pvm.)

Nokian VPP Controller -ohjelmisto varmistaa akkujen turvallisen käytön reservimarkkinoilla ja arvioi ylimääräisen varavirta-akkujen kapasiteetin tukiasemien sähkönkulutusprofiilien perusteella. Se hyödyntää koneoppimisalgoritmeja luodakseen älykkäitä tarjouksia ja tekee huutokaupprosessista saumattoman mobiilioperaattoreille. Ohjelmisto tukee nopean taajuusreservin markkinoita, jotka vaativat alle sekunnin reaktioajan, ja alhainen viive saavutetaan lähes reaaliaikaisilla käsittelypalvelimilla ja Nokian sähköjärjestelmällä. (*Nokia Oyj*, ei pvm.)

Nokia ei anna tarkkaa tietoa ohjelmiston hinnasta mutta hinnoittelu perustuu tuotonjaon periaatteeseen eli Nokia veloittaa sopimuksessa määritellyn osuuden markkinoilta saatavaan tuottoon. Oletamme laskelmia tehdessämme, että Nokian osuus markkinoilta saadusta tuotosta on 20%.

8.5 Vuosittainen tuotto toteutuneeseen dataan perustuen

Yhdistämälle edellisissä kappaleissa laskettu bruttotuotto sekä vähentämällä bruttotuotosta operatiiviset kulut, saamme laskettua potentiaalisen tuoton liittämällä tutkittavana olevan energiavaraston sähkömarkkinoille.

$$\text{Tuotto (€)} = \text{Bruttotuotto (€)} - \text{automaatiojärjestelmän kulut (€)}$$

$$\text{Tuotto (€)} = 142295,46€ - (20\% * 142295,46€) = 113836,37€$$

Vuosien 2022 – 2024 toteutuneisiin keskiarvoihin perustuen, tutkittavana olevalla energiavarastolla on mahdollista saavuttaa noin 114k€ vuosittainen tuotto nopean taajuusreservin markkinalta.

8.6 Tulevan tuoton simulointi Monte Carlo -mallilla

Koska sähkömarkkinat ovat murroksessa ja markkinoiden dynamiikasta johtuen hankinta- ja tarjousmäärät, pysyvyys ja toteutuva hinta vaihtelevat vuosittain, parempi ymmärrys mahdollisista tulevista tuotoista pidemmällä aikavälillä saadaan simuloimalla tuottoja esimerkiksi kymmenen vuoden ajanjaksolta erilaisilla parametreilla. Lyijyakkujen elinkaari on vähintään 15 vuotta, joten simulointi kymmenen vuoden ajanjaksolta vaikuttaa järkevältä. Simuloimisen työkaluna päädyin hyödyntämään Monte Carlo -mallia, mikä on toteutettavissa ilman maksullisia ohjelmistoja ja onnistuu MS Excel -taulukkolaskentaohjelmistoa hyödyntämällä.

8.6.1 Monte Carlo -mallin esittely

Monte Carlo -menetelmän keksijöinä pidetään Nicholas Metropolista ja Stanislaw Ulamia, jotka julkaisivat The Monte Carlo Method -artikkelin Journal of the American Statistical Association -lehdessä syyskuussa 1949. Artikkelissa kuvataan Monte Carlo -menetelmä, joka on tilastollinen lähestymistapa matemaattisen fysiikan ongelmien ratkaisemiseen. Menetelmä soveltuu erityisesti

differentiaaliyhtälöiden ja integro-differentiaaliyhtälöiden tutkimiseen, joita esiintyy luonnontieteissä. (Nicholas Metropolis & S. Ulam, 1949)

Monte Carlo -menetelmä on hyödyllinen tilanteissa, joissa perinteiset menetelmät eivät ole käytännöllisiä, kuten järjestelmissä, joissa on kohtalainen määrä osia. Menetelmä perustuu satunnaisotantaan ja tilastollisiin analyyseihin, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi pelien todennäköisyyksien laskemiseen. Monte Carlo -menetelmä on tilastollinen lähestymistapa, joka mahdollistaa monimutkaisten matemaattisten ja fysikaalisten ongelmien ratkaisemisen satunnaisotannan ja tilastollisten analyysien avulla. Menetelmä on erityisen hyödyllinen tilanteissa, joissa perinteiset menetelmät eivät ole käytännöllisiä tai riittäviä. (Nicholas Metropolis & S. Ulam, 1949)

8.6.2 Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt muuttujat

Valitsin Monte Carlo -mallissa käytettäväksi muuttujiksi hankintamäärän tunteina (pysyvyys), hankintahinnan ja hankintatehon.

Hankintamäärä on vaihdellut vuosien 2022 aikana 1032 ja 1966 tunnin välillä.

Hankintahinta on vaihdellut samalla ajanjaksolla käytännössä 10€/MW ja 50€/MW välillä keskiarvohinnan ollessa 30,74€/MW ja mediaanihinnan ollessa 15,00€/MW. Myös 10€/MW pienempiä hintoja on maksettu mutta silloin kyseessä on ollut vain satunnaiset lyhyet ajanjaksot päivinä, jolloin hankintamäärä on ollut todella vähäistä, joten rajasin poikkeuksellisen pienen hinnan jaksot tarkastelun ulkopuolelle, koska ne vääristävät simulaation tulosta.

Hankintateho on vaihdellut 10MW ja 50MW välillä keskiarvon ollessa 15,53MW ja mediaanin 13,30MW. Simuloinnin ajanjaksoksi valitsin kymmenen vuotta ja suoritin simulaatiota 3000 kertaa. Simuloinnissa käytetyt muuttujien arvot esitetty alla olevassa taulukossa.

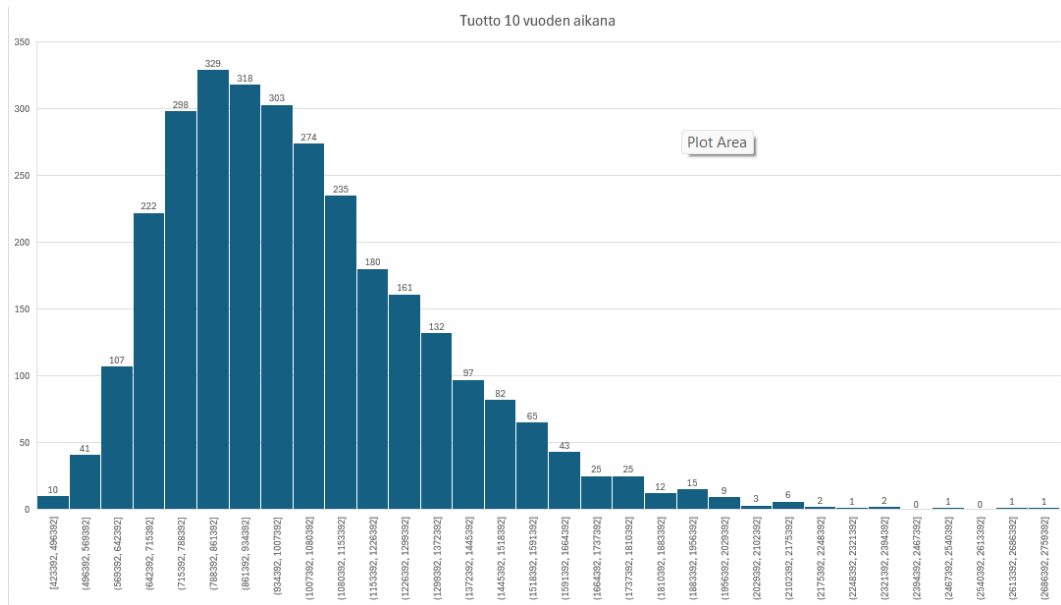
Taulukko 2. Monte Carlo -simulaatiossa käytettyjen muuttujien arvot

Numero	Hankintahinta €, ka MW	Hankintamäärä/vuosi, h	Hankintateho, MW
10	50	2000	50
9	30	1900	35
8	20	1800	25
7	18	1700	20
6	16	1600	18
5	14	1500	16
4	13	1400	14
3	12	1300	12
2	11	1200	11
1	10	1100	10

Simuloin tuottoa 10 vuoden ajalta hyödyntäen MS Excel -taulukkolaskentaohjelmistoa. Markkinaosuudeksi arvioin 20%. Suoritin simulaation 3000 kertaa. Simuloinnissa käytin apuna alla esitettyä funktiota, mikä on sama kaikissa MS Excel -taulukon 30000 solussa:

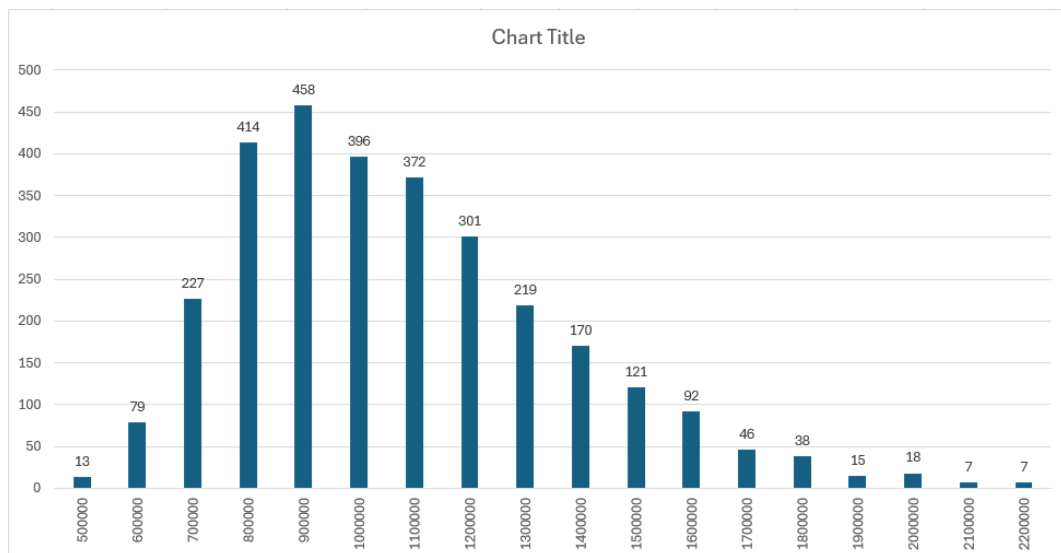
```
=(VLOOKUP(RANDBETWEEN(1;10);$A$3:$D$12;4;))*(VLOOKUP(RANDBETWEEN(1;10);$K$3:$L$12;2;)*(VLOOKUP(RANDBETWEEN(1;10);$M$3:$N$12;2;))) *0,2*0,8
```

Laskin saadun tuoton 10 vuoden ajalta yhteen 3000 simulaation osalta. Simuloinnin tuloksena muodostettu Histogrammi-kuvaaja esitetty alla.



Kuva 10. Monte Carlo -simulaation tulos 3000 simulaation otannalla

Simulaation tuloksen tulkitsemisen helpottamiseksi tein simulaation tuloksista frekvenssijakaumakuvaajan, mikä esitetty alla.



Kuva 11. Monte Carlo -simulaation tulos esitetty frekvenssi-kuvaajana tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi

Kuvaajasta voimme laskea todennäköisyydet eri tuottotasoille 10 vuoden aikana. Todennäköisyydet esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 3. Monte Carlo -simulaation perusteella lasketut tuottotodennäköisyydet 10 vuoden ajanjaksolta

Tuotto 10 vuoden aikana	Frekvenssi	Simulaatiot	Todennäköisyys
> 500000€	3000	3000	100%
> 700000€	2891	3000	96,4%
> 800000€	2681	3000	88,8%
> 900000€	2267	3000	75,6%
> 1000000€	1809	3000	60,3%
> 1100000€	1413	3000	47,1%
> 1200000€	1041	3000	34,7%
> 1300000€	740	3000	24,7%
> 1400000€	521	3000	17,4%
> 1500000€	351	3000	11,7%

Mikäli otamme mukaan kaikki toteumat frekvenssikuvaajasta, mitkä toteutuvat yli 300 kertaa, voimme laskea, millä todennäköisyydellä tuotto on 800000€ ja 1200000€ välillä.

$$\text{Todennäköisyys} = \text{Frekvenssien summa} / \text{Simulaatioiden määrä}$$

$$\text{Todennäköisyys} = 1941 / 3000 = 64,7\%$$

Voimme todeta, että 64,7% todennäköisyydellä seuraavan 10 aikana kertynyt tuotto tulisi olemaan yli 800000€ mutta alle 1200000€.

8.7 Yhteenveto eri tuottolaskelmien tuloksista

Edellisissä kappaleissa olen arvioinut mahdollista tuottoa reservimarkkinoilla ja nopean taajuusreservin markkinalla kolmella eri tavalla:

1. Fingridin reservituottolaskurin avulla
2. Fingridin avoimen datan perusteella vuosien 2022 – 2024 toteutuneisiin keskiarvoihin perustuen
3. Simuloimalla tuottoa 10 vuoden ajalta Monte Carlo -analyysillä

Fingridin reservituottolaskuri ei anna realistista kuvaa tuotto-odotuksesta, koska nopean taajuusreservin hankintamäärä on liian pieni, jotta keskimääräinen tuotto 1 megawattia kohti olisi realistinen odotus 30MW tarjottavalle teholle. Usein hankintamäärä jää huomattavasti alle 30MW ja markkinalla on muitakin tarjoajia, mikä lisää kilpailua ja vähentää yksittäisen toimijan mahdollisuutta tarjota isoa tehoa markkinalle. Reservituottolaskurin antama tulos ei siis sovellu liiketoimintapäätöksen perusteeksi.

Avoimen datan perusteella laskettu tuotto-odotus perustuen 2022 – 2024 toteutuneisiin keskihintoihin antaa paljon reservituottolaskuria realistisemman arvion mahdollisesti saatavilla olevasta tuotosta.

Monte Carlo -simulaatiolla tehty arvio antaa mielestäni todennukaisimman arvion mahdollisesti saatavilla olevasta tuotosta. Simulaatio on erittäin toimiva tapa arvioida tuottoja, mikäli markkinadynamiikka ei oleellisesti muutu. Simulaation perusteella voimme arvioida tilastollisen todennäköisyyden tuotolle kymmenen vuoden ajanjaksolla. Simulaatiolla voimme myös halutessamme testata erilaisia skenaarioita markkinadynamiikan muutoksen osalta muuttamalla simulaatiossa käytettäviä parametreja.

Kymmenen vuotta on pitkä aika nykymaailmassa, missä teknologia kehittyi vauhdilla. Ilmastonmuutos ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen tähtäävien toimien vaikutus voimistuu, kun uusiutuvan energiantuotannon osuus kaikesta energiantuotannosta kasvaa. Mikäli kehitys jatkuu nykyisenkaltaisena ja aiemmin esiteltyt arviot reservimarkkinoiden kehityksestä toteutuvat, voivat kymmenen vuoden aikana kertyvät tulot olla huomattavasti aiempaa korkeampia. Tällä hetkellä nopean taajuusreservin markkina on liian pieni, jotta 30MW laitoksen liittämistä saataisiin maksimaalinen tuotto. Mikäli nopean taajuusreservin markkinan koko kasvaa ennusteiden mukaisesti, voi saatavilla oleva hyöty olla tämän hetken arviota huomattavasti suurempi.

9 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Telia Finland Oyj:n omistamien matkaviestinverkon tukiasemien varavirta-akustojen hyödyntämistä sähkömarkkinoilla, erityisesti reservimarkkinoilla, ja muuttaa operaattorien välttämätön kuluerä tulonlähteeksi. Tutkimuskysymyksenä oli selvittää, mikä on liiketoiminnallisesti kannattavin tapa hyödyntää teleoperaattorin matkaviestinverkossa käytössä oleviin akkusähkövarastoihin varastoitua energiaa sähkömarkkinoilla tutkimuksen reunaehdot huomioiden.

Tutkimus toteutettiin laadullisena tapaustutkimuksena, jossa keskityttiin yhteen suomalaiseen teleoperaattoriin ja sen matkaviestinverkossa käytössä oleviin akkusähkövarastoihin. Aineistonkeruumenetelminä käytettiin puolistrukturoituja haastatteluja ja dokumenttianalyysiä. Kerätty aineisto analysoitiin sisällönanalyysin menetelmin.

Tutkimuksen keskeiset havainnot osoittivat, että matkaviestinverkon tukiasemien akustot voivat toimia varavoimana sähkökatkosten aikana ja osallistua sähköverkon taajuuden säätelyyn tarjoamalla nopeaa taajuusreserviä (FFR). Tämä auttaa ylläpitämään sähköverkon tasapainoa ja varmistaa, että sähköntuotanto ja -kulutus ovat jatkuvasti tasapainossa. Taajuuden säätelyyn osallistuminen voi tuoda merkittäviä tuloja reservimarkkinoilta.

Johtopäätöksenä todettiin, että hajautetun akkusähkövaraston hyödyntäminen sähkömarkkinoilla on liiketoiminnallisesti kannattavaa. Energiavaraston kapasiteetti ja tehontuotto ovat riittäviä osallistumaan markkinoille, ja markkinoilta on mahdollista saada merkittävää tuottoa olemassa olevia akustoja hyödyntämällä. Lisäksi tutkimus osoitti, että reservimarkkinoiden kehittyminen ja kasvava tarve säätökapasiteetille luovat uusia liiketoimintamahdollisuuksia teleoperaattoreille.

LÄHTEET

AlShafi, M., & Bicer, Y. (2021). Thermodynamic performance comparison of various energy storage systems from source-to-electricity for renewable energy resources. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119626>

Anneli Sarajärvi, & Jouni Tuomi. (2017). *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*.

Climate regulating ocean plants and animals are being destroyed by toxic chemicals and plastics. (2021). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3860950

Elalfy, D. A., Gouda, E., Kotb, M. F., Bureš, V., & Sedhom, B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. Teoksessa *Energy Strategy Reviews* (Vsk. 54). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>

Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. (2017). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

Energiavirasto. (ei pvm.). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-a). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyy/johdanto-sahkomarkkinoihin/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-b). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyy/johdanto-sahkomarkkinoihin/#sahkomarkkinoiden-aikajana>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-c). Noudettu 8. helmikuuta 2025, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-d). Noudettu 2. huhtikuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/sahkovarastojen-jarjestelmatekniset-vaatimukset-sjv2019.pdf>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-e). Noudettu 19. tammikuuta 2025, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/reservituottolaskuri/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-f). Noudettu 19. tammikuuta 2025, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/reservituottolaskuri/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-g).

Fingrid Oyj. (ei pvm.-h). Noudettu 13. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&pageSize=5&page=1&language=fi>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-i). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#sahkon-johdannaismarkkinat>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-j). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#vuorokausimarkkinat>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-k). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#paivansisaiset-markkinat>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-l). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/#tasehallinta>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-m). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat->

Fingrid Oyj. (ei pvm.-n). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-o). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-p). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-q). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-r). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-s). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-t). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-u). Noudettu 2. huhtikuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-v). Noudettu 2. huhtikuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/yleiset-liittymisehdot/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-w). Noudettu 2. huhtikuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/tekniset-vaatimukset/sahkovarastojen-jarjestelmatekniset-vaatimukset/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-x). Noudettu 17. helmikuuta 2025, osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/sjv2024---luonnos-energiavirastolle-vahvistettavaksi-10_2024---muutosmerkinnoin.pdf

Fingrid Oyj. (ei pvm.-y). Noudettu 9. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/#tekniset-vaatimukset>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-z). Noudettu 9. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#tekniset-vaatimukset>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-aa). Noudettu 19. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/#hankinta>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-ab). Noudettu 19. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>

Fingrid Oyj. (ei pvm.-ac). *Liite 2 Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin Markkinasopimukseen.*

Fingridlehti. (ei pvm.-a). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/reservien-tarve-kasvaa-kohisten/>

Fingridlehti. (ei pvm.-b). Noudettu 30. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/sahkon-hinta-heilahtelee-nain-sahkon-hinta-maaraytyy/>

Fortum Spring. (ei pvm.). Noudettu 14. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.fortum.com/products-and-services/smart-energy-solutions/fortum-spring>

Katri Ojasalo, Teemu Moilanen, & Jarmo Ritalahti. (2014). *Kehittämistyön menetelmät.*

Marathon M FT. (ei pvm.). Noudettu 3. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.exidegroup.com/fi/fi/tuotteet/marathon-m-ft>

Marathon M FT / M12V100FT. (ei pvm.). Noudettu 3. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.exidegroup.com/fi/fi/tuotteet/marathon-m-ft>

Markus Laine, Pekka Jokinen, & Jarkko Bamberg. (2007). *Tapaustutkimuksen taito.*

Michael C. Hoff. (2022). *Energy Storage Technologies and Applications, Artech House.* [http://ebookcentral.proquest.com/lib/vamklibrary-ebooks/detail.action?docID=29703391.](http://ebookcentral.proquest.com/lib/vamklibrary-ebooks/detail.action?docID=29703391)

Nicholas Metropolis, & S. Ulam. (1949). *The Monte Carlo Method.*

Nokia Oyj. (ei pvm.). Noudettu 26. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2024/02/22/nokia-adds-virtual-power-plant-to-its-leading-energy-efficiency-solution-portfolio/>

Traficom. (ei pvm.). Noudettu 13. maaliskuuta 2024, osoitteesta https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys_viestint%C3%A4verkkojen_ja_palvelujen_varmistamisesta_sek%C3%A4_viestint%C3%A4verkkojen_synkronoinnista_Perustelumuistio.pdf

Tukes. (ei pvm.). Noudettu 14. joulukuuta 2024, osoitteesta <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#vedyn-varastointi>

LIITTEET**LIITE 1****MONTE CARLO -SIMULAATIO**