



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Robin Hagqvist

UPHS- JA BESS-TARJONTAMALLIEN LUONTI JA LIIKEVAIHDON TARKASTELU

Tekniikka
2023

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Robin Hagqvist
Opinnäytetyön nimi	UPHS- ja BESS-tarjontamallien luonti ja liikevaihdon tarkastelu
Vuosi	2023
Kieli	Suomi
Sivumäärä	78
Ohjaaja	Ossi Koskinen

Sääpohjainen energiantuotanto on kasvattanut rooliaan modernissa energiantuotannossa ympäristöystävällisyytensä ja uusiutuvuutensa ansiosta. Kuitenkin näiden uusiutuvien energianlähteiden tuotanto on voimakkaasti riippuvainen sääolosuhteista, mikä aiheuttaa sähköntuotannon vaihtelua ja ennustettavuusongelmia. Tämä jatkuva vaihtelu voi vaikuttaa haitallisesti sähköverkon vakauteen ja tehotasapainoon.

Sääpohjaisen energiantuotannon heittelystä voi aiheutua merkittäviä taloudellisia vaikutuksia. Sähköntuotannon vaihtelun aikana voi olla vaikeaa ennakoida tarkasti, kuinka paljon energiaa on saatavilla tietyllä hetkellä. Tämä puolestaan voi johtaa energian hintojen vaihteluihin sähkömarkkinoilla, mikä vaikuttaa suoraan sähköntuottajiin ja kuluttajiin. Sähköntuottajien on pyrittävä sopeutumaan tähän sääpohjaiseen vaihteluun ja etsimään eri vaihtoehtoja taloudellisen tuoton optimoimiseksi.

Yksi päätekijä sääpohjaisen energiantuotannon tehokkaassa hallinnassa on energian varastointi. Varastot toimivat välineenä, joka tasoittaa sähköntuotannon vaihteluita ja pitää yllä sähköverkon vakautta. Tämä on ratkaisevan tärkeää sähkömarkkinoiden kannalta, koska se mahdollistaa sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpitoa. Tarjontamalli määrittää, miten varastojen kapasiteettia ja varastoitua energiaa käytetään tehokkaasti sähköverkon tarpeisiin. Tarjontamalli vaikuttaa suoraan siihen, kuinka tehokkaasti varasto tasoittaa sähköntuotannon vaihteluita.

Työssä käsitellään maanalaisen pumppuvoimalaitosten (UPHS) ja akkuvarastojen (BESS) toimintaa energiamarkkinoilla ja Fingridin ylläpitämällä reservimarkkinoilla. Lopputyön tarkoituksena on kehittää UPHS- ja BESS-tarjontamallit, joiden tavoitteena on saada kapasiteeteille optimaalinen tarjonta. Tarjontamalleilla varastoille lasketaan arvioitu liikevaihto 1.1-31.8.2023 ajanjaksolle. Työn laskennat perustuvat julkisiin tietoihin ja työssä ei ole käytetty kohdeyrityksen liikesalaisuuksiksi luokiteltavia tietoja. Tämän työn tulokset pohjautuvat laatijan omiin analyyseihin ja laskelmiin. Näiden analyyysien ja laskelmien pohjalta voidaan todeta, että UPHS-toiminta ei ole kannattavaa vuoden 2023 rahoitusmarkkinatilanteessa, kustannusten nousun ja riskien takia. BESS-toiminta on kannattavaa halvan teknologian takia ja varastolle suotuisan markkinatilanteen takia.

ABSTRACT

Author	Robin Hagqvist
Title	Creation of UPHS and BESS supply models and analysis of turnover
Year	2023
Language	Finnish
Pages	78
Name of Supervisor	Ossi Koskinen

Weather based energy production has been playing an increasingly important role in modern energy production thanks to its environmental friendliness. However, the production of these renewable energy sources is highly dependent on weather conditions, which causes volatility and predictability problems in electricity production. This constant volatility can adversely affect the stability of the electricity grid.

There are significant economic implications of weather-based generation. When electricity generation fluctuates, it can be difficult to accurately predict how much energy will be available at any given time. This in turn can lead to fluctuations in energy prices in the electricity market, directly affecting the economic performance of electricity producers and consumers. Electricity generators must seek to adapt to this weather-based volatility and look for different options to optimize economic returns.

One of the key elements in the efficient management of weather-based energy production is its efficient energy storage management. Storages serves as a tool to smooth out fluctuations in electricity production and maintain the stability of the electricity grid. This is crucial for the electricity market and to the infrastructure, as it allows maintaining a balance between electricity production and consumption.

The supply model determines how storage capacity and energy is efficiently used to meet the needs of the markets. The model has a direct impact on the ability of a storage facility to smooth out fluctuations in electricity production and optimize its economic return.

Exploring the operation of underground pumped storage and battery storage, the energy market and the reserve market operated by Fingrid. The work will aim at developing the UPHS and BESS supply models with the objective of obtaining an optimal supply of capacities. Based on the supply models, an estimated turnover for the reserves will be calculated for the period 1.1-31.8.2023. The work does not consider exact price ranges, operating methods or data for the reserves, due to the company's business secrets. The theory of supply models in this work is based on my own reflections. No EPV business mechanisms have been used in the work all have been created for this thesis and the reserves, using public data.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO	7
2 SÄHKÖ- ja RESERVIMARKKINAT	9
2.1 Johdanto sähkömarkkinoihin	9
2.2 Sähkömarkkinat ja NordPool	11
2.2.1 Vuorokausimarkkinat	11
2.2.2 Päivänsisäiset markkinat	14
2.3 Fingridin reservimarkkinat	15
2.4 Tasehallinta	22
3 PUMPPUVOIMALAITOS- JA AKKUTEKNIikka	28
3.1 Pumppuvoimalaitostekniikka	33
3.1.1 Maanalainen pumppuvoimalaitos	36
3.1.2 Pyhäjärven pumppuvoimalaitos hanke	38
3.2 Teollisenmittaluokan akkuvarastot	39
4 LIIKEVAIHTOON JA TARJONTAMALLEIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	48
4.1 Tulot	48
4.1.1 Fingridin tuotteiden korvaukset	48
4.1.2 Sähkömarkkinoiden day ahead- ja intraday- markkinoiden myynnit	50
4.2 Kustannukset	51
4.2.1 CAPEX	51
4.2.2 OPEX	52
4.2.3 Muut kulut ja verotus	53
4.3 Tarjontamallin teoreettinen viitekehys	54
4.3.1 UPSH	54
4.3.2 BESS	57
5 TARJONTAMALLIT JA LIIKEVAIHDON TARKASTELUT	58
5.1 Pumppuvoimalaitoksen tarjontamalli ja liikevaihto	58
5.1.1 Kulutusvaiheen optimointi	59
5.1.2 Tuotantovaiheen optimointi	61
5.1.3 Fingridin ajojen optimointi	62
5.1.4 Liikevaihdon tarkastelu	62
5.2 Bess-tarjontamalli ja -liikevaihto	64
5.2.1 Fingridin-tarjonta ja -rajoitteet	64

5.2.2 Liikevaihdon tarkastelu	67
6 LIIKEVAIHTOJEN TARKASTELUN ANALYYSI	69
7 YHTEENVETO	71
7.1 Validiteetti ja reliabiliteetti	71
7.2 Jatkotutkimusehdotukset	71
LÄHTEET	73

Kuva- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Sähkömarkkinoiden rakenne ja alustat.	10
Kuvio 2. Nordpoolin Day ahead market tuotteet ja selitys.	13
Kuvio 3. Ylijäämäisen ja alijäämäisen alueen hinnan muodostuminen.	14
Kuvio 4. Päivänsisäisenmarkkinan tuotteet ja selitys.	15
Kuvio 5. Sähköverkon taajuuden tasapaino kuvitettuna.	16
Kuvio 6. Miten ylös- ja alassäätötarjoukset muodostuu.	17
Kuvio 7. Reservituotteet Suomessa ja niiden ominaisuuksia.	17
Kuvio 8. Reservituotteet ja niihin soveltuvat tuotanto-/kulutuskohteet.	18
Kuvio 9. Aikamääreet, joita ennen tarjoukset jätettävä järjestelmään.	19
Kuvio 10. ENTSO-E:n säätöjen aktivointiajat.	20
Kuvio 11. Vaihtoehdot FRR-aktivointiajalle ja Hz:lle.	21
Kuvio 12. MARI- Ja PICASSO-hankkeen jäsenet.	22
Kuvio 13. Tasepoikkeamat tasevastaavan taseselvityksessä.	24
Kuvio 14. eSett:n ja markkinaosapuolten väliset suhteet.	25
Kuvio 15. eSett:n toimintaa havainnollistettuna.	26
Kuvio 16. Ennen eSett:n toiminnan aloittamista.	27
Kuvio 17. Fingridin skenaario vedyn tuotannon ja sähköntuotannon tulevaisuudesta. ..	30
Kuvio 18. McKinsey energy storage insights BESS market model.	31
Kuvio 19. McKinsey energy storage insights missä BESS voidaan hyödyntää.	32
Kuvio 20. EPV Energian uniikki hanke hahmoteltuna.	33
Kuvio 21. Pelton-turbiinin kehä ja jaettu kauha.	34
Kuvio 22. EPV Energia -esitys: UPHS, arvioidut häviöt latauksessa ja purussa.	35
Kuvio 23. Kaksi erilaista maanalle sijoitettavaa pumppuvoimalaa.	37
Kuvio 24. Työn aikana tutkittiin ympyröityä akkutyyppejä.	40
Kuvio 25. Toiminnan ylläpitämiseen vaadittavat pääkomponentit.	40
Kuvio 26. Eri katodimateriaalien vahvuuksia ja heikkouksia.	41
Kuvio 27. Lataussyklin syvyysprosentti katodikemioilla, Depth Of Discharge.	43
Kuvio 28. Akkujen hintojen lasku kaupallistamisen jälkeen.	44
Kuvio 29. Akkuteknologian edistymisen vaikutus hinnoitteluun.	45
Kuvio 30. Hahmotelma mihin akkuja voidaan käyttää varastoinnissa.	47
Kuvio 31. UPHS-tarjonta kapasiteetin jakauma.	55
Kuvio 32. UPHS-tarjonnan selkeyttämistä Fingridin markkinoille.	56
Kuvio 33. BESS-tarjontakapasiteetin jakauma huomioiden varaston pitkäikäisyys.	57
Kuvio 34. Kulutusvaiheen tarjonta-Excel, jossa tarjotaan halvimmille tunneille.	60
Kuvio 35. Tuotantovaiheen tarjonta-Excel, tarjontaesimerkki NordPoolin hinnoilla.	61
Kuvio 36. Lataus- ja purkurajoitukset lämpötilan tai jännitteen avulla.	66
Taulukko 1. Reservimarkkinoiden arvioidut tulot määrätyillä kapasiteeteilla.	50
Taulukko 2. FG tuotteiden KA hankintamäärä MW ja hinta e/MW ajanjaksolta 1.1-31.8.2023.	55
Taulukko 3. UPHS liikevaihto kulujen kanssa.	63
Taulukko 4. BESS liikevaihto kulujen kanssa.	67

1 JOHDANTO

Sähkömarkkinat ovat muuttuneet paljon säähöjaisen energiatuotannon takia. Yhtenä ongelmana on lisääntyvä säätövoiman tarve. Vakaan tuotannon tarjonta vaatii optimaalista tarjontamallia, jonka avulla voidaan luoda automatisoitu kehys, jonka mukaan kapasiteettia tarjotaan tietyn verran tiettyinä markkinahetkenä. Tämä sama logiikka pätee säätövoimaan, sille on luotava optimaalinen tarjontamalli. Tämän tarjontamallin avulla tarjotaan kapasiteettia hintatehokkaasti ja markkinat huomioiden.

Tutkimusongelmana on se, että kuinka saadaan luotua tarjontamalli, jolla saadaan optimoitu pumppuvoimalaitoksen ja akkuvaraston taloudellinen kannattavuus energia ja reservi markkinoilta. Optimaalista vastausta ei työn aikana kuitenkaan voida saada, koska käytettävä tieto perustuu menneeseen hinta ja säätöhankinta dataan.

Tarjontamallien pohjalta lasketaan arvioitu liikevaihto ajanjaksolle 1.1–31.8.2023, huomioiden arvioidut OPEX- ja CAPEX-kulut sekä energiaverotus ja mahdolliset sanktiot. Varastojen toiminnan kannattavuus perustuu suureen markkinahintojen heittelyyn ja kasvavaan säätökapasiteetin tarpeeseen.

Liikevaihdon laskennat ja kannattavuuden arviointi perustuvat tarjontamalleihin ja kuluihin. Liikevaihdon tuloksia pidetään arvioina, koska työn aikana ei voinut käyttää ajankohtaisia tutkimuksia liikesalaisuuksien vuoksi. Liikevaihtojen tulosta verrattiin saatavilla olevien laskelmien kanssa ja työn tulosta voidaan pitää lopputyön kohtalaisen tarkkana.

Pumppuvoimalan toiminta perustuu halvan ja kalliin sähkön hyödyntämiseen, kun sähkö on edullista tai negatiivista alareservistä pumpataan vettä yläreserviin. Yläreserviä voidaan purkaa, kun on kysyntäpiikki tai markkinahinnat ovat kalliita. Purettaessa varastoa yläreservistä päästetään vettä alareserviin turbiinin läpi, joka tuottaa sähköä verkkoon.

Akkuvaraston kapasiteetin ja kemiallisen käyttäytymisen takia sitä käytetään ainoastaan FFR- ja FCR-tuotteille, jossa varastoa käytetään nopeille ja pienille

vastuksille tai latauksille. Akkuvaraston pitkäikäisyyden vuoksi sen varaustaso ei saa mennä tietyn varaustason alle tai yli, näistä puhutaan minimi ja maksimi varaustasona. Näiden tasojen välissä toiminta on vapaata.

2 SÄHKÖ- JA RESERVIMARKKINAT

Tässä luvussa esitellään sähkö- ja reservimarkkinoiden toimijat, Nordpool ja suomalaisen reservimarkkinan ylläpitäjä Fingrid. Toimijoiden tuotteet eli Fingridin eri reservit, joita tarjotaan kantaverkon tueksi ja ylläpitoon. Nordpoolin vuorokausi- ja päivänsisäisetmarkkinat ja niissä käytettävät tuotteet. Sähkö- ja reservimarkkinoiden toiminnan ympärillä on tasevastaavina toimivia yrityksiä ja eSett, joka tarjoaa taseselvityspalveluitaan.

2.1 Johdanto sähkömarkkinoihin

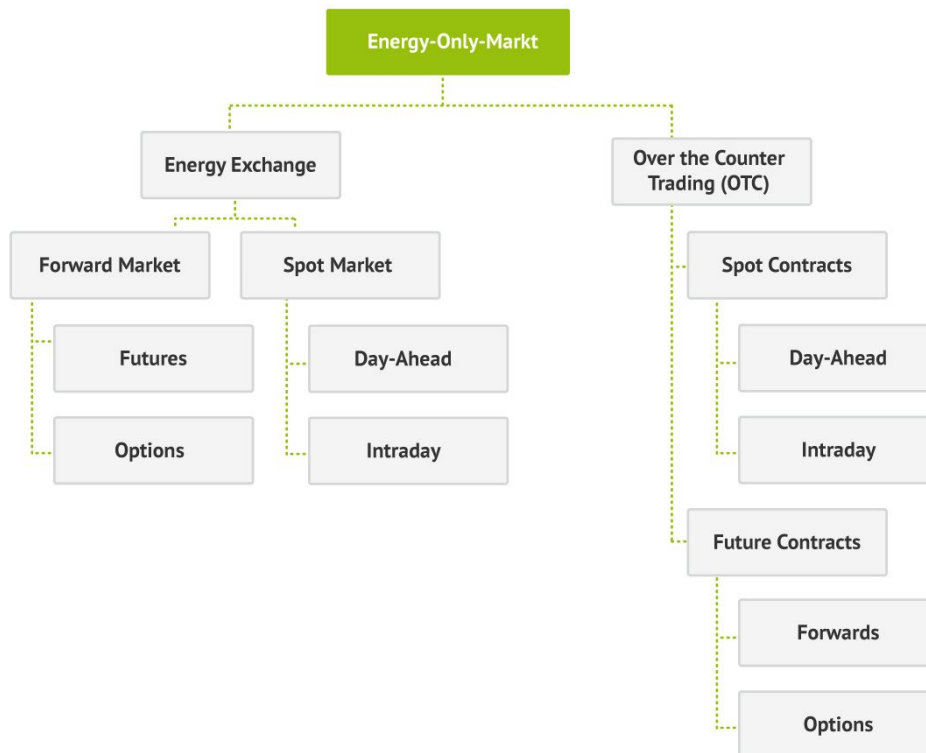
Suurien yritysten osakkeita myydään ja ostetaan pörssissä tuotteena samoin on mahdollista ostaa energiaa, tuotteena. Ennen toimeksiantoja vaaditaan ehtoja ennen kuin voi ostaa tai myydä energiaa pohjoismaiden sähköpörssissä Nordpoolissa, jolloin sähkön siirtäminen valtioiden rajojen yli on mahdollista. Nordpoolin osakekannasta omistaa Euronext 66 % ja kantaverkkoyhtiöt omistavat 34 % osakekannasta. Kantaverkko yhtiöiden osakeomistajuus jakautuu kolmen eri maan kesken, Liettua EPSO-G 39.6 %, Norja Statnett 32.2 % ja Ruotsi Kraftnat 28.2 %. Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid ylläpitää ja kehittää Suomen kantaverkkoa, jonka avulla koteihin ja teollisuuteen saadaan sähköä.¹

Suomalainen reservimarkkina perustuu nopeaan taajuuden tuenta reserviin (FFR), taajuuden vakautusreserviin eli käyttö- ja häiriöreserviin (FCR-N ja -D), automaattiseen taajuuden palauttamisreserviin (aFRR) ja manuaaliseen taajuuden palauttamisreserviin (mFRR). Palauttamisreservit koostuvat säätökapasiteettimarkkinoista ja säätösähkömarkkinoista. Kapasiteettimarkkinoilla ylläpidetään kapasiteettia ja Fingridin lähettämän aktivointi signaalin tai pyynnön myötä kapasiteetti aktivoidaan.

Sähkömarkkinat rakentuvat kuvan 1 mukaisesti finanssi-, vuorokausi-, päivänsisäisiin-, säätö- ja reservimarkkinoihin, jonka jälkeen toimitetaan energia

¹ Nordpool omistajat

asiakkaalle. Tärkeä osa on myös taseselvitys, jossa tarkastetaan tuotannon ja kulutuksen erot, eli onko kulutus ollut sitä mitä on ennustettu.



Kuvio 1. Sähkömarkkinoiden rakenne ja alustat.²

Finanssimarkkinoilla käydään kauppaa NASDAQin ylläpitämällä johdannaismarkkinoilla, joissa tarjotaan eri johdannaissopimuksia futuurit, forwardit, hintaerosopimukset ja optiot. Nämä sopimukset eivät johda fyysiseen sähkön toimitukseen. Sähkömarkkinatoimijat käyttävät johdannaistuotteita riskienhallintaan sähkön markkinahinnanvaihtelua vastaan. Toimija voi johdannaistuotteiden avulla suojautua matalilta ja korkeilta sähkön hinnoilta.

Futuurit tarkoittavat yleisellä sijoittamistermistöllä sitä, että sitoudutaan ostamaan ja myymään tuotetta tietyssä aikana tulevaisuudessa esimerkiksi vuoden aikamääreellä. Tällä johdannaistuotteella haetaan turvaa hintojen vaihteluista.³ Optio on johdannaissopimus, jossa on kaksi osapuolta myyjä ja

² Energiamarkkinoiden tuotepuu Next Kraftwerke

³ "Sahkoporssin_ammattisanasto.pdf".

ostaja. Myyjä sitoutuu asettamaan hyödykkeensä tiettyä ajankohtana sovittuun hintaan myyntiin. Ostaja tekee oston toteutus päätöksen.⁴

Nordpoolin markkinoille voi osallistua ainoastaan jäsenyyden kautta. Jäsenyyttä hakevan täytyy olla rekisteröitynyt yritys, jonka tilanne on taloudellisesti vakaa. Yrityksellä on oltava voimassa oleva VAT-tunnus, eli lupa käydä kauppaa Eurooppalaisten maiden kanssa ja säätötarjous sopimus oman maan tai kaupankäynti alueen kantaverkkoyhtiön kanssa. Nordpoolissa on 360 asiakasta 20 eri maasta.⁵

2.2 Sähkömarkkinat ja NordPool

Euroopan maiden alueella toimiva sähkön markkina-alusta, joka tarjoaa eri kaupankäynti- ja selvityspalveluita sähkömarkkinoille. Nordpool on yksi Euroopan suurimmista sähkön markkinapaikoista ja Nordpoolin merkitys kaikkien osallistuvien maiden sähkömarkkinoille on suuri. Nordpool on perustettu 1990 luvulla, kun Norjan parlamentti halusi vapauttaa sähkömarkkinoita sääntelystä. Vuonna 1995 julkistettiin lakikehys, jossa esitettiin puitteet integroiduille sähkömarkkinoille pohjoismaissa. Tämän raportin pohjalta kehittyi perusteet SPOT markkinoille eli vuorokausimarkkinoille.

Toiminta perustuu avoimeen dataan, tehokkaaseen toimintaan ja toiminnan tavoitteena on edistää tervettä kilpailua sähkömarkkinoilla. Nordpoolin avulla osapuolet voivat hankkia tai myydä tuotettaan markkinatilanteeseen nähden. Nordpoolin toimintaa käyttää sähköntuottajat, sähkökuluttajat, sähkön välittäjät, rahoituslaitokset ja muut alan toimijat.⁶

2.2.1 Vuorokausimarkkinat

Nordpool tarjoaa jäsenilleen alustan, jossa voi käydä kauppaa seuraavaa vuorokautta varten. Esimerkkituotantolaitos tuottaa sähköä 100 MW:n teholla,

⁴ "Optiot - Mandatum Trader".

⁵ "Becoming a customer | Nord Pool".

⁶ "History | Nord Pool".

mutta sitä voidaan säätää 20 MW ylös tai alas markkinoiden hintojen mukaan, jos hinnat ovat kalliita, laitos tuottaa maksimia ja hintojen ollessa matalat tuotantoa halutaan optimoida. Tuotantolaitoksen huomien tuotantokapasiteetti ilmoitetaan Nordpooliin vähintään ennen kello 13.00 Suomen aikaan. Tulokset kuinka paljon tuotantolaitosta ajetaan huomenna, saadaan kello 13.50. Nämä toimet tehdään asiakkaiden käytössä olevien ohjelmistojen kautta. Nordpool on myös helpottanut markkinatoimintaansa monien eri ohjelmointirajapintojen avulla.

Vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa eri tuotteilla, yksittäiselle tunnille tarkoitettu tilaus, block order, exclusive group ja flexi order. Suurin osa vuorokausimarkkinoiden kaupankäynnistä tapahtuu yksittäisten tuntien tuntitilauksen perusteella. Toimija määrittelee kullekin tunnille osto- tai myyntimäärän ja voi valita hinnasta riippuvan tai riippumattoman toimeksiannon.⁷ Kuvassa 2 on esitetty Nordpoolin päätuotteet vuorokausimarkkinoilla.

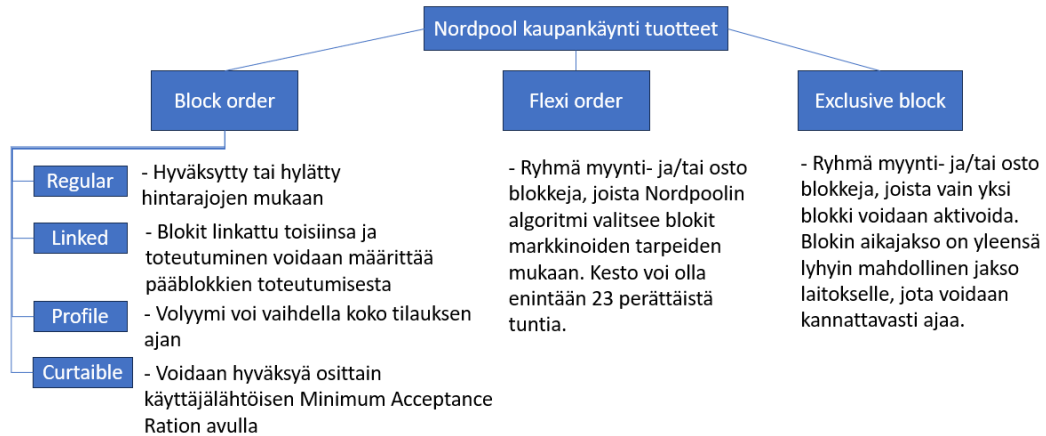
Minimum Acceptance Ratio MAR on työkalu, joka rajoittaa hyväksytyyn blokin määrää sen verran mitä käyttäjä on MARin määrännyt olevan. Profiili blokkitilauksessa volyyymi voi vaihdella koko blokin ajan. Blokin toimeksiannon vähimmäiskesto on Pohjoismaissa ja Baltiassa kolme tuntia, UK:ssa kaksi tuntia ja CWE-alueella tunnin. Profiiliblokkitilaukset voidaan tarvittaessa linkittää toisiinsa ja niitä voi supistaa tarvittaessa.⁸

Exclusive group on joukko myynti- tai ostoblokkeja, joista vain yksi voi aktivoitua. Aktivoitunut exclusive group -blokki on kaikista tehokkain ja hinnat ovat osuneet oikein. Exclusive group tilauksessa ei ole mahdollista linkittää tarjouksia toisiinsa, mutta rajoittaminen on mahdollista, kunhan MAR ei alita 50 %.⁹

⁷ "Single hourly order | Nord Pool".

⁸ "Block order | Nord Pool".

⁹ "Exclusive group | Nord Pool".



Kuvio 2. Nordpoolin Day ahead market tuotteet ja selitys.

Sähkönhinta Nordpoolin alueella koostuu hinta-alueista, jonka avulla voidaan kontrolloida ja ennakoida sähköverkon ruuhkia. Alueilla voi olla eri tuotanto ja kysyntä, jonka myötä hintoihin syntyy eroavaisuuksia. Osto ja myyntitoimeksiantojen perusteella syntyy tarjous ja kysyntäkäyrän muoto, tähän myös vaikuttaa ruuhkatilanteet, sää, vuodenaika ja päivämäärä.¹⁰

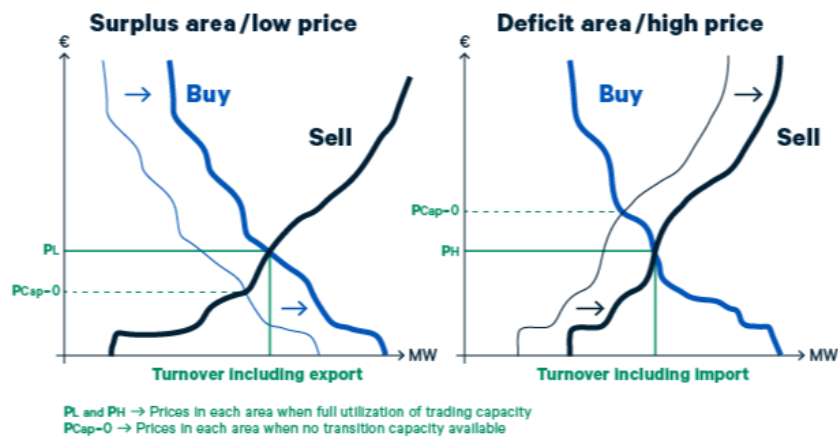
Siirtoverkonhaltijat ovat jakaneet Pohjoismaat ja Baltian maat omiin tarjousalueisiin sähköverkon ylikuormituksen hallitsemiseksi. Tarjouskilpailualueilla voi olla sähkön tasapaino, alijäämä tai ylijäämä. Sähköä virtaa alueilta, joilla tarjottu hinta on alhaisempi, alueille, joilla kysyntä on suurta ja tarjottu hinta korkeampi.

Jos tarjousalueiden välinen siirtokapasiteetti ei riitä hintojen täydelliseen lähentymiseen eri alueilla, ylikuormitus johtaa siihen, että tarjousalueilla on erilaiset hinnat. Sähkönkulun ollessa tarjousalueiden välillä siirtoverkonhaltijoiden asettamien kapasiteettirajojen puitteissa, eri tarjousalueiden aluehinnat ovat samat.

Kysyntä- ja tarjontakäyrien muoto määräytyy yhteenlaskettujen tuntikohtaisten osto- ja myyntitilausten perusteella. Kuten alla olevasta kuvasta 3 nähdään,

¹⁰ " Price calculation | Nord Pool".

hyväksytyjen blokkitarjousten määrä sekä tarjousalueen nettovirta liikuttavat käyriä ja muodostavat aluehinnan käyrän leikkauspisteessä. Kaikille tuottajille maksetaan lasketun aluehinnan mukaan, ja vastaavasti kaikki kuluttajat maksavat saman hinnan. Blokkitarjouksiin sovelletaan samaa periaatetta, jos tarjous hyväksytään, kuluttaja tai tuottaja maksaa tai saa aluehinnan.



Kuvio 3. Ylijäämäisen ja alijäämäisen alueen hinnan muodostuminen.¹¹

Siirron aikana tapahtuvat häviöt otetaan huomioon, siten että Itämeren kaapeliin häviökerroin on 2.4 %, NorNed kaapelin 3.2 %, Nordlink 3.2 % ja North Sea Link 3.4 % eli ostetusta energiasta häviää tietyn verran energiaa. Esimerkiksi Itämeren kaapelia käytettävässä siirrossa energiaa häviäisi 2.4 %.¹²

2.2.2 Päivänsisäisetmarkkinat

Intraday on osa energiamarkkinoita, jossa voidaan tehdä kauppvoja seuraavalle 24 tunnille. Intraday antaa joustavuutta tuotannon ja kulutuksen väliseen tasapainottamiseen, koska sääriippuvaisen tuotannon myötä hintojen vaihtelevuus voi olla suurta päivän sisällä. Markkinatilanteen muuttuessa,

¹¹ Nord pool price calculation

¹² " Loss functionality | Nord Pool".

äkillinen tuotantohäiriö, säätilanne tai kulutuksen lisääntyminen, Intraday mahdollistaa taseen tasapainon korjaamisen.



Kuvio 4. Päivänsisäisenmarkkinan tuotteet ja selitys.

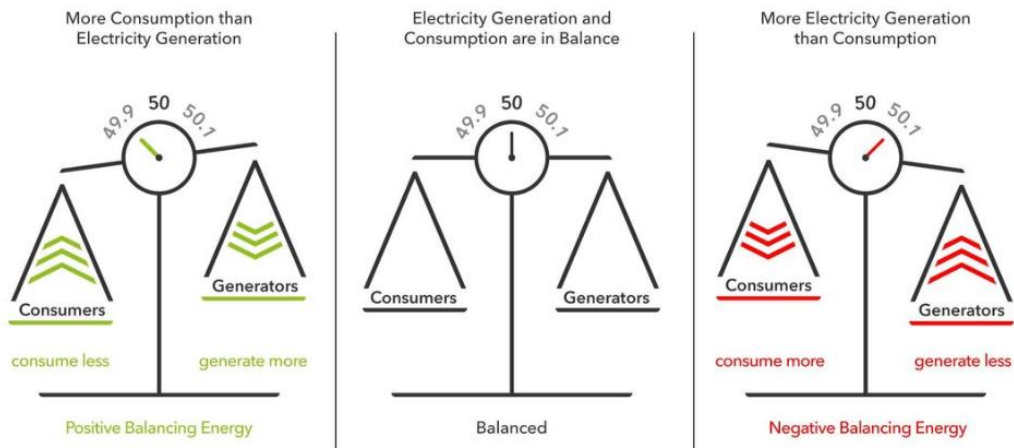
Tyypit millä voidaan käydä kauppaa ovat limit order, iceberg order (IBO), Fill or kill (FoK) ja immediate or cancel, kuvassa 4 on esitettyä tuotteet ja selitys. Limit order on myynti- tai ostotarjous, jossa on käyttäjän asettama hintaraja. Iceberg order IBO on suurille volyymeille tarkoitettu, suuri volyymi hajotetaan pieniin osiin markkinoille yhden tarjouksen taakse. Tarjouksen mennessä läpi nämä muut pienemmät tarjoukset tulevat markkinoille esille. Fill or kill (FoK) on limit order, jossa koko volyymi tarjouksen jälkeen poistetaan tai täytetään markkinoilla. Immediate or Cancel (IoC) on limit order, jossa mahdollisimman suuri osa tarjouksesta sovitetaan ja loput, jotka eivät toteudu vedetään pois markkinoilta.¹³

2.3 Fingridin reservimarkkinat

Suomalainen energiantuotantoportfolio on muuttunut paljon ja se aiheuttaa vaihtelevuutta energiantuotannossa, koska sääpohjainen energiantuotanto on vaihtelevaa ja hankalasti ennustettavaa. Nämä ovat syitä, miksi reservimarkkinoita tarvitaan tasapainoittamaan yli- ja alijäämiä sähkötaseissa. Säätosähkö ja reservit ovat ajallisesti erittäin vaihtelevia sekunneista viiteentoista minuuttiin.¹⁴

¹³ "Order types intraday | Nord Pool".

¹⁴ "Reservimarkkinat - Fingrid".



Kuvio 5. Sähköverkon taajuuden tasapaino kuvitettuna.¹⁵

Kuvassa 5 on kuinka kulutuksen ja tuotannon epätasapaino vaikuttavat kantaverkon taajuuteen. Enemmän kulutusta kuin tuotantoa taajuus laskee, jos tuotantoa on liikaa verrattuna kulutukseen, taajuus nousee. Tehotasapainoilla ylläpidetään taajuusohjatuilla reserveillä ja manuaalisesti toteutettavilla säädöillä. Mikäli taajuusohjatuilla reservillä ei kyetä hallitsemaan taajuutta sallituissa rajoissa, täytyy tehdä manuaalisesti ylös- ja alassäätöjä säätösähkömarkkinoilla.¹⁶

Vuorokausimarkkinoille suunnitellaan ja ennustetaan tuotantoa, tämä tuotanto vaihtelee joko sään, vahinkotilanteiden, onnettomuuksien, luonnon aiheuttaminen syiden takia tai vikatilanteissa. Tuotannossa nämä ongelmat näkyvät tasevajena eli tuotantoa ei ole tarpeeksi kulutusta kohden, jolloin markkinoille syntyy ylössäädön tarve. Alassäätö markkinoilla tuotantoa halutaan vähentää tai lisätä kulutusta, esimerkiksi käynnistämällä kulutuskohteita tai hetkellisesti vähentämällä tuotantolaitosten tuotantoa. Kuvassa 6 on millä toimenpiteillä voidaan toteuttaa alas- ja ylössäädöt.

¹⁵ Next Kraftwerken kuva taajuuden tasapaino

¹⁶ Tasehallinta Fingrid



Kuvio 6. Miten ylös- ja alässäätötarjoukset muodostuu.¹⁷

Reservituotteet Suomessa ovat nopea taajuusreservi (FFR), taajuusohjattu häiriöreservi (FCRD), taajuusohjattu käyttöreservi (FCRN), automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) ja säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR).

	FFR	FCRD	FCRN	aFRR	mFRR
	Nopea taajuusreservi, Suomi 18 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi ~300 MW, Pohjoismaissa yht. 1 450 MW (ylös) ja 1400 MW (alas)	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi ~120 MW, Pohjoismaissa yht. 600 MW	Automaattinen taajuuden palautusreservi, Suomi 60-80 MW Pohjoismaissa yht. 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat, Mitoittava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, hankitaan pienen inertian tilanteissa	Suuremmissa taajuuspoikkeamissa, erikseen ylössäätö ja alässäätö	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Kolmessa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa (12,5 min)

Kuvio 7. Reservituotteet Suomessa ja niiden ominaisuuksia.¹⁸

Kuvasta 7 saadaan käsitystä mitä varten reservimarkkinan tuotteet ovat. FFR Fast frequency reserve, joka hankitaan pienen inertian hallintaan. Inertia tunnetaan yleisesti muutoksen vastustamisena ja hitautena. Sähköverkon inertia viittaa

¹⁷ Fingrid reservimarkkinat

¹⁸ Fingrid esitys ”Reservituotteet ja reservien markkinapaikat”

sähköverkossa olevaan liike-energiaan. Inertia on hyvä asia sähköverkossa, koska mitä enemmän verkossa on inertiaa sitä hitaammin muutokset sähkökulutuksessa ja -tuotannossa vaikuttavat verkon taajuuteen.¹⁹ FFR on tarkoitettu siis vastaamaan inertian pientymisen tuomaan ongelmaan, sähköverkon taajuuden heittelyyn. FFR-tuotteella osallistutaan pelkästään ylössäätöjen kautta taajuuden tukemiseen, kun taajuus on alueella 49.5–49.7 Hz.²⁰

FCR-N Frequency containment reserve, näitä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. FFR otetaan käyttöön vain vakavissa taajuuden heittelyissä. FCR pitää taajuuden normaalitaajuusalueella 49.9–50.1 Hz. FCR-D taajuusohjattu häiriöreservi pyrkii pitämään taajuuden 49.5 tai 50.5 Hz eli vikatilanteen sattuessa häiriöreservin tehtävä on pitää taajuus tietyssä arvossa. D-2-FCR-markkinoilla tarkoitetaan Fingridin ylläpitämiä reservimarkkinoita, josta Fingrid hankkii taajuuden vakautusreserviä CET-vuorokaudelle. Hankinta ajoittuu vuorokautta ennen vuorokausimarkkinoita, Fingridin on ilmoitettava markkinan avautumisesta kotisivuillaan kaksi viikkoa aikaisemmin.²¹ Kuvassa 8 on millä kohteilla voidaan osallistua tietyille tuotteelle.



Kuvio 8. Reservituotteet ja niihin soveltuvat tuotanto-/kulutuskohteet.²²

¹⁹ Laasonen, "Mitä on inertia? - Fingrid-lehti".

²⁰ "Nopea taajuusreservi (FFR) - Fingrid".

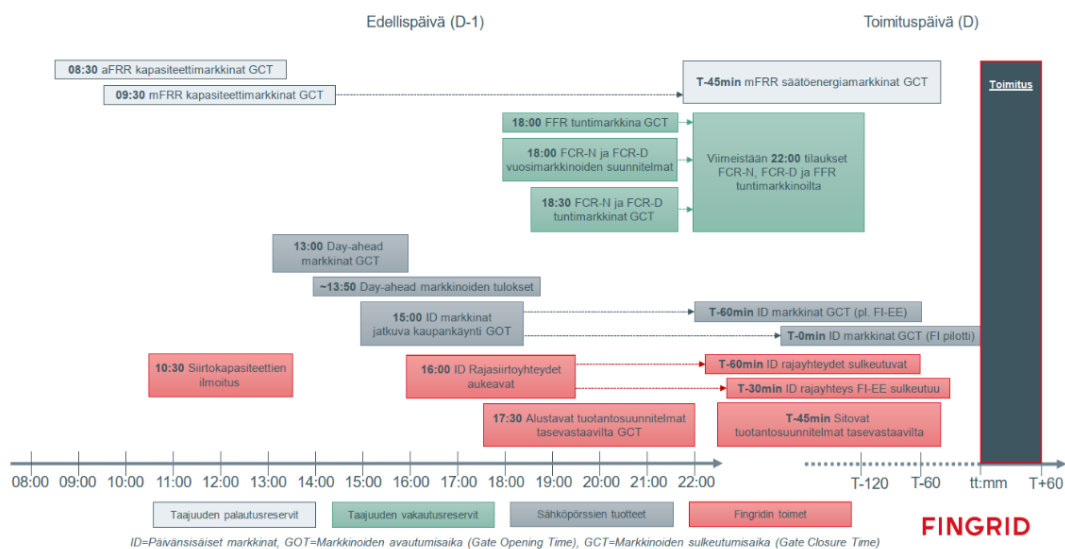
²¹ "Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) - Fingrid".

²² Fingrid julkinen esitys "Reservituotteet ja reservien markkinapaikat"

Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR automatic frequency restoration reserve. Reservin tarkoituksena on sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen ja taajuudensäätöalueen tehotasapainon palauttaminen suunniteltuun arvoon. Aktivointi perustuu pohjoismaisen synkronia alueen taajuuspoikkeamaan sekä kantaverkkoyhtiön lähettämään tehonmuutossignaalin perusteella.²³

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR tarkoituksena on luoda toimivat markkinat reservitoimittajille. Kantaverkkoyhtiö tilaa reservitoimittajilta säätökapasiteettia eli kykyä vastata verkossa tapahtuviin muutoksiin sekä säätösähköä eli kun sähkön kulutus kasvaa yllättävästi niin Fingrid voi tilata säätösähkön heidän reservitoimittajiltansa.²⁴

Markkinat vaativat, että kuvan 9 tuotteet tarjotaan aikamääreisiin mennessä, muuten tarjoukset eivät pääse tuntimarkkinoille mukaan.



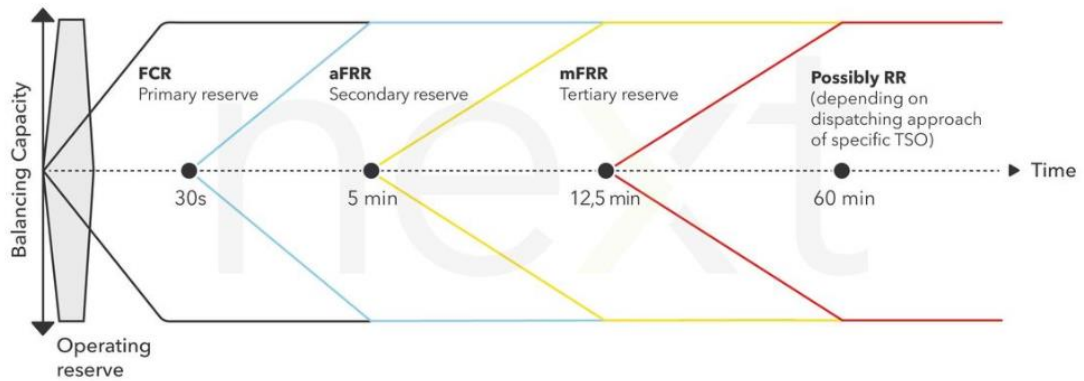
Kuvio 9. Aikamääreet, joita ennen tarjoukset jätettävä järjestelmään.²⁵

²³ "Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) - Fingrid".

²⁴ "Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) - Fingrid".

²⁵ Sähkömarkkinoiden aikajana Fingrid

Kuvan 9 perusteella aFRR- ja mFRR-tarjoukset tulee jättää ennen 8.30 ja 9.30, kun FFR- ja FCR-tarjoukset jätetään 18 ja 18.30 mennessä.



Kuvio 10. ENTSO-E:n säätöjen aktivointiajat.²⁶

Kuvassa 10 on mitkä ylös- ja alassäätöihin vaadittavat aktivointiajat Entso-e on määrittänyt. Termejä primary, secondary ja tertiary ei käytetä Suomessa, vaan vakautusreservi, palautusreservi ja korvaava reservi. FCR-markkinoilla säädön tulee aktivoitua 0.10 Hz:n taajuusmuutoksen seurauksena täysimääräisesti kolmessa minuutissa.²⁷ aFRR-reservin aktivointi perustuu Fingridin 10 sekunnin välein lähettämään aktivointisignaaliin. Aktivointipyynnön ollessa negatiivinen se tarkoittaa alassäätöä ja ollessa positiivinen se tarkoittaa ylösäätöä. Aktivointi tulee aloittaa vähintään 30 sekunnin kuluttua signaalista ja kokonaisuudessaan reservikohteen pitää olla aktivoituna 5 minuutin kuluttua aktivoinnista.²⁸ mFRR markkinoilla säätö on toteutettava maksimiin 15 minuutin kuluttua säädön aktivoitumisesta. Säädön toteutettavuus täytyy olla voimassa toteutuneelle ajanjaksolle.²⁹ FFR-reservin aktivointiaika voidaan valita kolmesta eri vaihtoehdosta, jotka ovat esitetty kuvassa 11.

²⁶ ENTSO-E tuotteiden säätöajat

²⁷ FCR tekniset vaatimukset sivu 5 kpl 3.1

²⁸ aFRR tekniset vaatimukset sivu 4 kpl 3 ja 4

²⁹ mFRR ehdot ja edellytykset sivu 7 kpl 5

Aktivointitaajuus (Hz)	Aktivointiaika (s)
≤ 49,70	≤ 1,30
≤ 49,60	≤ 1,00
≤ 49,50	≤ 0,70

Kuvio 11. Vaihtoehdot FRR-aktivointiajalle ja Hz:lle.³⁰

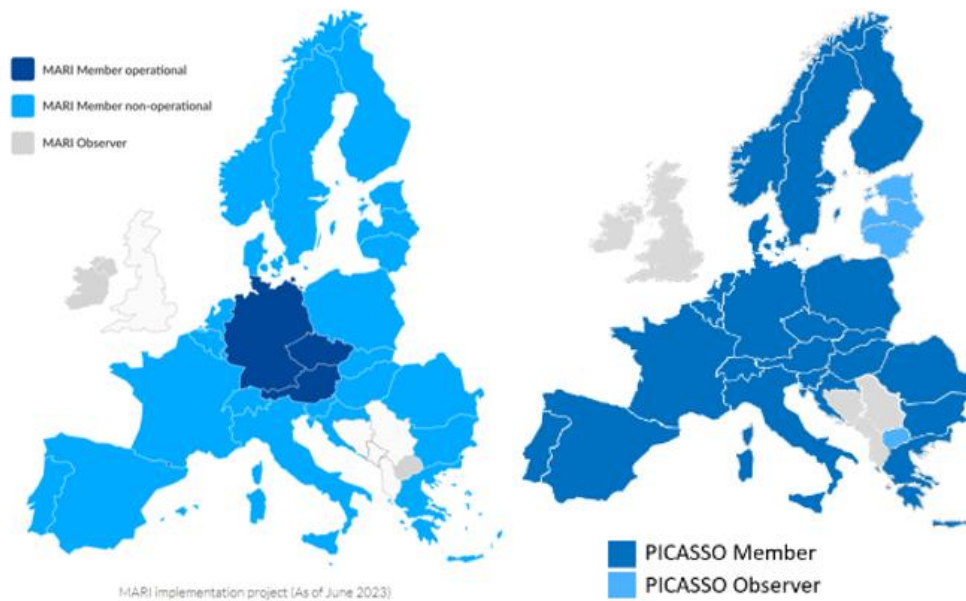
Käytännössä vaihtoehdot tarkoittavat sitä, että taajuuden ollessa 49.70 tai alle reservin tulee olla aktivoitunut kokonaan 1.3 sekunnissa.³¹

Fingrid on asettanut tavoitteeksi osallistua Eurooppalaisille taajuuden palautusreserveille mFRR ja aFRR vuonna 2024. Tämä korvaisi pohjoismaiden säätösähkömarkkinoiden toiminnan, mutta ei korvaisi pohjoismaiden säätökapasiteetin markkinoita. MARI on mFRR-reservin yhtenäishanke Eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa, PICASSO on aFRR-reservin yhtenäishanke Eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Kuvassa 12 ovat molempien hankkeiden jäsen- ja tarkkailijamaat.³²

³⁰ FFR tekniset vaatimukset

³¹ FFR tekniset vaatimukset sivu 5 ja kpl 3

³² Yhtenäiset säätömarkkinat pohjoismaissa



Kuvio 12. MARI- Ja PICASSO-hankkeen jäsenet.^{33 34}

Reservitoimittajalla näkyvin muutos tapahtuu Pohjoismaiden markkina-alueen laajenemisena Euroopan markkina-alueeksi. Tuotemäärittelyt myös muuttuvat, mFRR tulee olla täysin aktivoituna 12.5 min aktivoinnista ja aFRR 5 minuutissa. Tarjoukset ovat jätettävä paikalliselle kantaverkkoyhtiölle viimeistään 25 minuuttia ennen tunnin alkua. Taajuuden palautusreservit aFRR ja mFRR aktivoituminen vapauttavat vakautusreservit ensisijaiseen tehtävään, eli pienempien taajuuden heittojen korjaamiseen.

2.4 Tasehallinta

Tasehallinnalla tarkoitetaan energiataseen hallintaa tavalla, että osapuolten tuotanto ja hankinta vastaavat myyntiä ja kulutusta. Tuotannon ennustaminen seuraavalle SPOT-vuorokaudelle voi olla epävarmaa, vaikka käytettäisiin tekoälyllä luotuja algoritmeja tai suurta joukkoa kokeneita analyytikkoja. Vaihtelua voi syntyä sään muutoksista, äkillisistä laitosten vikaantumista sekä kulutuksen odottamattomasta noususta tai laskusta. Tasehallinnassa tarkoituksena on pitää

³³ Mari jäsenmaat

³⁴ Picasso jäsenmaat

oma tuotanto- tai hallintatase mahdollisimman lähellä nollaa, silloin toiminta on kustannustehokasta.

Tasevastaavat pyrkivät tasapainottamaan oman sähkön hankintansa ja myyntinsä. Käytännössä toimijoille syntyy kuitenkin tasepoikkeamaa kulutuksen ja tuotannon ennustusvirheiden takia. Tämän tasepoikkeaman Fingrid tasapainottaa hankkimillaan sähköjärjestelmän reserveilla.³⁵

Aikaisemmin käytössä olleen kahden taseen malli on korvattu 1.11.2021 yhden taseen mallilla. Keskeiset muutokset kahden taseen mallista ovat, yhden taseen muodostuminen tuotannosta ja kulutuksesta. Aikaisemmin tuotannolle ja kulutukselle oli omat tasepoikkeamat, nyt ne näkyvät yhtenä alijäämänä tai ylijäämänä. Uudella yhden taseen mallilla ennakoitiin siirtymää kohti varttitasetta, joka mahdollistaa entistä tarkemman ennustamisen ja taseen tasapainottamisen.³⁶

2.4.1 Tasevastaava

BRP on tasevastaavana toimiva yritys, jolla on voimassa oleva taseselvityssopimus eSettin kanssa ja voimassa oleva tasehallintasopimus kantaverkkoyhtiön kanssa ja joka on tasevastuussa omasta ja puolestaan tuottajan, kuluttajana tai sähkön myyjänä tai muiden tuottajien, kuluttajien tai sähkön myyjien puolesta.³⁷

BSP on tasepalvelun toimintoja tarjoava yritys, eli tasesähkön tai tasehallintakapasiteetin tai molempien huolehtimista. BSP:llä on voimassa oleva sopimus eSettin ja kantaverkkoyhtiön kanssa tasepalvelun tarjoamisesta kantaverkkoyhtiölle. Tasesähkö on tasepalvelun tarjoajan tarjoama sähköenergia, jota siirtoverkonhaltijat käyttävät tasapainottamiseen.³⁷

Tasevastaavilla on tasevastuu, joka perustuu 12.8.2021 Valtioneuvoston antamaan asetukseen sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta, jolla

³⁵ Markkinoille lisää toimijoita Jani Piipponen

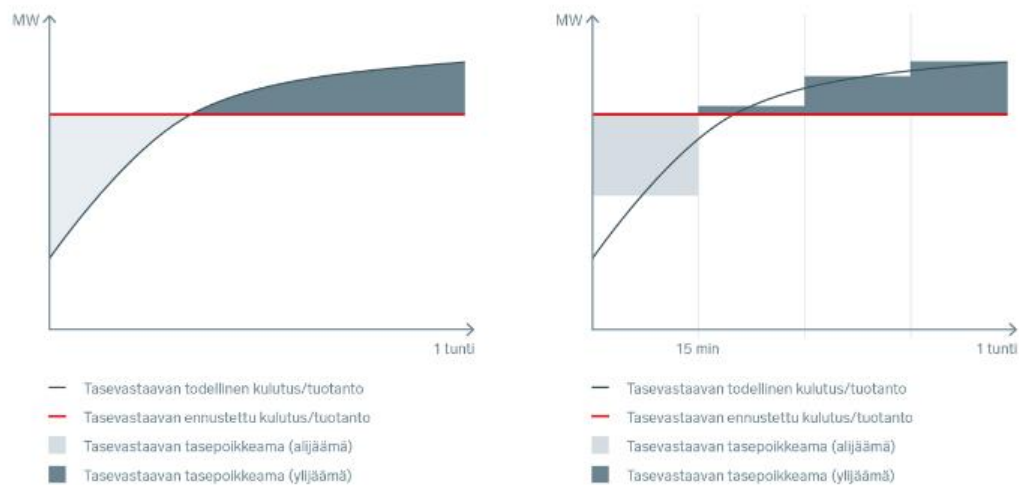
³⁶ Yksitasemalli helpottaa kulutuksen ja tuotannon yhdistämistä

³⁷ ”Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja, eSett”.

tarkoitetaan sähkökaupan osapuolen tuotanto ja hankinta kattavat tämän kulutukset ja sähkön toimitukset kunkin tunnin aikana. Kaikki Sähkökaupan osapuolet ovat tasevastuullisia.³⁸

Tasevastaavan velvollisuuksiin Valtioneuvoston antaman asetuksen mukaan kuuluu taseselvitys, jonka tarkoituksena on selvittää toteutuneet sähkötoimitukset jokaisella taseselvitysjaksolla. Taseselvitysjakso on aikayksikkö, jolla tasevastaavien tasepoikkeamat lasketaan.³⁹

Taselaskennan esimerkissä on tasevastaava, jonka taseselvitysjakson aikana toteutunut tuotanto on 60 MWh, toteutunut kulutus -40 MWh ja ID-markkinoiden myynti on -30 MWh. Tasevastaavalle tällöin muodostuu -10 MWh alijäämää, jonka kattamiseksi Fingrid myy tasevastaavalle tasesähköä tasepoikkeaman myyntihinnalla.



Kuvio 13. Tasepoikkeamat tasevastaavan taseselvityksessä.⁴⁰

Kuvan 13 mukainen varttitase otettiin käyttöön 22.5.2023 entisen tunnin taseselvitysjakson tilalle, tämän hyötyjä ovat tarkempi taseselvitys ja tulevaisuudessa eurooppalaisille säätömarkkinoille osallistuminen. Hinnoittelu

³⁸ Tasevastuu lain luku 2 lakipykälä 1

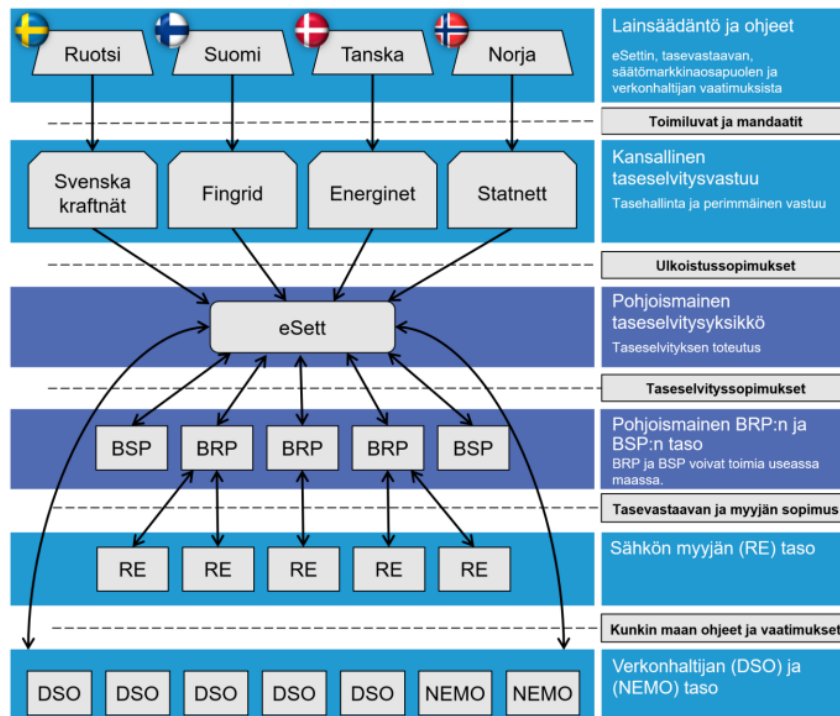
³⁹ Tasevastuu ja taseselvitysjakso

⁴⁰ Tasepoikkeaman esimerkki kuvana lähteestä

vuorokausimarkkinoilla on vielä tunnin aikataulussa, eli jokaiselle neljälle vartille on sama tunnin hinnoittelu. Hinnoittelun on tarkoitus muuttua varttipohjaiseksi, jokaiselle vartille tulisi oma hinta. Tämä tapahtuu vasta kun säätösähkön hinta määräytyy vartin perusteella ja päivänsisäinen rajat ylittävä kaupankäynti pohjoismaissa siirtyy vartin resoluutioon.⁴¹

2.4.2 eSett

Vuonna 2017 toimintansa aloittanut yli tuhannelle sähkömarkkinaosapuolelle tase selvityspalvelujaan tarjoava yritys. Esett toimii pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden Fingrid Suomi, Energinet Tanska, Statnett Norja ja Svenska Kraftnät valtuutuksella, kaikki neljä yhtiötä omistavat yhtä suuret osakemäärät eSettiä.⁴² Kuvassa 14 on kuva eSett:n ulkoistussopimusten verkostosta ja markkinaosapuolten välisistä suhteista.



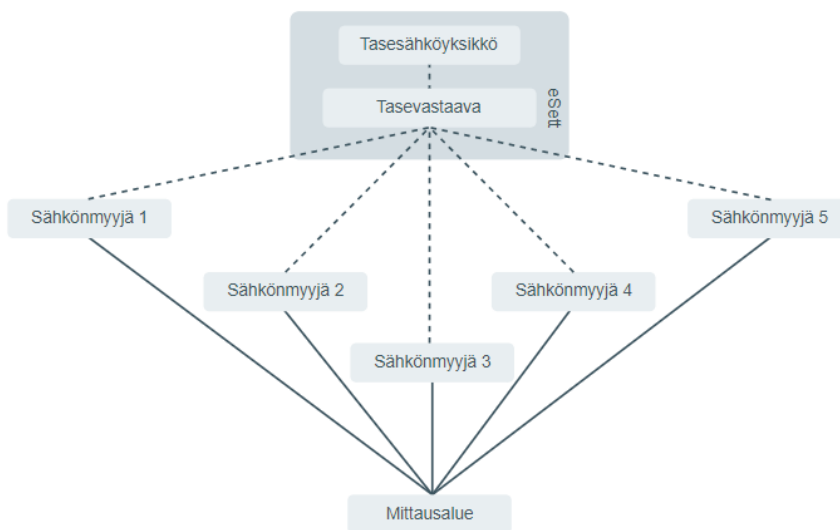
Kuvio 14. eSett:n ja markkinaosapuolten väliset suhteet.⁴³

⁴¹ Tasepoikkeaman laskenta

⁴² eSett in Brief | Nordic Imbalance Settlement | set.”

⁴³ eSett käsikirja

Päivittäisiin eSetin velvollisuuksiin kuuluu, taseselvitystietojen kerääminen, validointi ja hallinta, kerättyjen tietojen pitäminen markkinaosapuolten saatavilla, alustava taseselvitys, raportoidun tiedon seuranta ja lopullisen taseselvityksen tekeminen. Viikoittaisiin tehtäviin kuuluu, taseselvityksen laskutus, muiden maksujen laskutus kantaverkko-yhtiöiden puolesta, tasevastaavien ja tasepalvelun tarjoajien vakuuksien valvonta, niiden seuranta sekä kassavarojen hallinta. Esett myös laskee, julkaisee ja seuraa taseselvitysprosesseja säännöllisesti. Esett antaa asiakastukea sekä raportoi ja julkaisee taseselvitystuloksia, tähän vaaditaan jatkuvaa markkinoiden seurantaa.⁴⁴

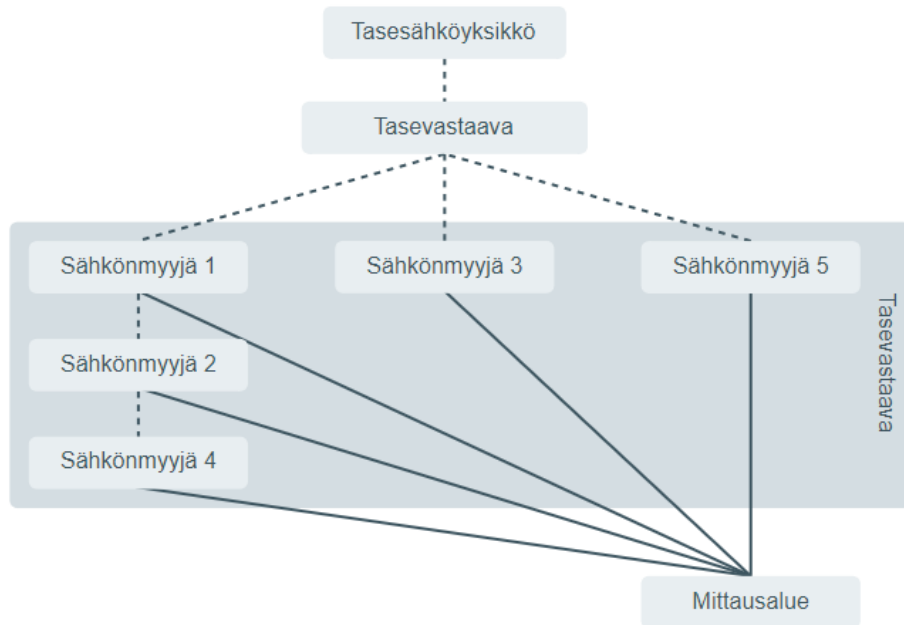


Kuvio 15. eSett:n toimintaa havainnollistettuna.⁴⁵

Esett laskee tasevastaavien taseselvityksen verkonhaltijoiden toimittamien tietojen perusteella. Tasepoikkeamat lasketaan tasevastaavakohtaisesti. Mittausalueelta saadaan yhtenäinen viiva eli toimitus, tapahtunut tuotanto tai kuorma. Tämä menee suoraan sähkönmyyjälle, joiden puolesta eSett laskee taseselvitykset ja ilmoittaa tämän suoraan tasesähköyksikölle.

⁴⁴ Pohjoismainen taseselvityksen käsikirja kpl 1.5.1

⁴⁵ Fingrid taseselvitys



Kuvio 16. Ennen eSett:n toiminnan aloittamista.⁴⁶

Kuvassa 15 on tilanteen eroavaisuus, kun eSett ei vielä ollut toiminnassa. Jokainen sähkönmyyjä oli velvoitettu ilmoittamaan yhtenäiselle tasevastaavalle taseselvityksensä, jonka jälkeen tasevastaava ilmoitti kaikkien tulokset tasesähköyksikölle. Nykyään eSett hoitaa valtakunnallisen taseselvityksen ylläpitämistä ja tekee tasevastaavien taseselvityksen heidän puolestansa, kuten kuvissa 15 ja 16 nähdään, että yksi toimintavaiheväli on vähentynyt.⁴⁷

⁴⁶ Fingrid taseselvitys

⁴⁷ Taseselvitysmallin kuvaus Fingrid

3 PUMPPUVOIMALAITOS- JA AKKUTEKNIikka

Tuuli- ja aurinkovoima tuotannon lisääntyessä säätökapasiteetin tarve kasvaa paljon. Kantaverkon inertia pienenee ja sen myötä taajuus heittelee herkemmin. PHS eli pumped hydro storage on yksi ratkaisu ongelmaan, johon tuotantoa voidaan varastoida. Varastointiteknologiana PHS on tutkituin, vanhin ja käytetyin muoto, maailmanlaajuisesti vuonna 2021 PHS-teknologian kapasiteetti oli 130 GW.

Suurimmat maat PHS-kapasiteetiltaan ovat olleet vuonna 2021 IRENA:n raportin mukaan, Kiina 36 GW, Japani 22 GW ja Yhdysvallat 22 GW sekä Euroopan alueen kapasiteetti oli 28 GW.⁴⁸ 1960-luvulla Richard D Harza kehotti käyttämään vanhoja kaivoksia hyödyksi ja rakentamaan niihin maanalaiset vesivoimalaitokset, Harzaa voidaan siis pitää UPHS eli underground pumped hydro storage -laitosten idean kehittäjänä. Samalla vuosikymmenellä Sorensen K.E julkisti tutkimuksensa että, tulevaisuudessa näiden laitosten suosio on suurempi kuin silloin.⁴⁹

Vanhojen kaivosten hyödyntäminen energiavarastoina on esimerkillistä kiertotaloutta, vanha ekosysteemi elvytetään toimintaan vielä seuraaviksi vuosikymmeniksi tukemaan vaihtelevaa säähypohjaista energiantuotantoa. UPHS on PHS rinnalla toinen muoto mihin vesivoimaa voidaan hyödyntää. Maanalaisen vesivoimalan rakentamiseen sisältyy paljon riskejä, joita ei yleensä tule vastaan, kun rakennetaan perinteistä vesivoimalaa.

Keskustelut Mine Storage edustajan kanssa, vahvistivat omaa näkemystäni kaivos pumppuvoimalaitosten asemasta tulevaisuudessa. Alalla on kuitenkin haasteita, jotka pitää selvittää aina ennen uusia hankkeita. Alueen sähköinfrastruktuuri, tarvetasapainotuotannolle ja markkinoiden tehokkuus. Kaivoksen ominaisuudet tulee ottaa erittäin tarkasti huomioon eli kuinka vanha kaivos on, mitä tekniikkaa kaivostoiminnassa on käytetty ja onko se toteutettu laadukkaasti, mitä kaivokseen

⁴⁸ ” Renewable Energy Statistics 2022”.

⁴⁹ Faktapaperi maanalaisista pumppuvoimaloista

on lisättävä, jotta se täyttää turvallisuus kriteerit ja minkälaiset kustannukset kyseisellä hankkeella tulee olemaan. Sijoittajina voi esimerkiksi toimia energiayhtiöt tai suuret teolliset toimijat.⁵⁰

Tulevaisuudessa pumppuvoiman kannattavuuden tilanne voi olla toisin, jos Suomeen kaavailut 23 vetyteollisuuden hanketta toteutuvat⁵¹. Toteutuneet vetyhankkeet lisäävät sähkönkulutusta huomattavasti, jos vetylaitokset ovat joustavia tuotannon tehon nostamisessa ja laskemisessa niitä voidaan hyödyntää kantaverkkoa tukevissa reserveissa. Tällöin ne toimisivat huippujen siirtäjinä ja samalla vievät suurten UPHS- ja PHS-laitosten perimmäisen tarkoituksen.

Suomen tuulivoimahankkeita on maalla 386 projektia eli 7 829 tuulivoimalaa, joista saadaan 63 100 MW tuotantotehoksi. Eniten projekteja on aloitusvaiheessa, 86 kappaletta, ja toiseksi eniten on YVA-menettelyissä, 82 kappaletta. Talusvesialueella tuulivoimala hankkeita on yhteensä 32 projektia ja tuulivoimaloita 3 169, joista saadaan yhteensä 57 607 MW tuotannoksi. Talusvesialueella on eniten projekteja esisuunnittelussa ja vain yksi hanke on luvitettu.⁵²

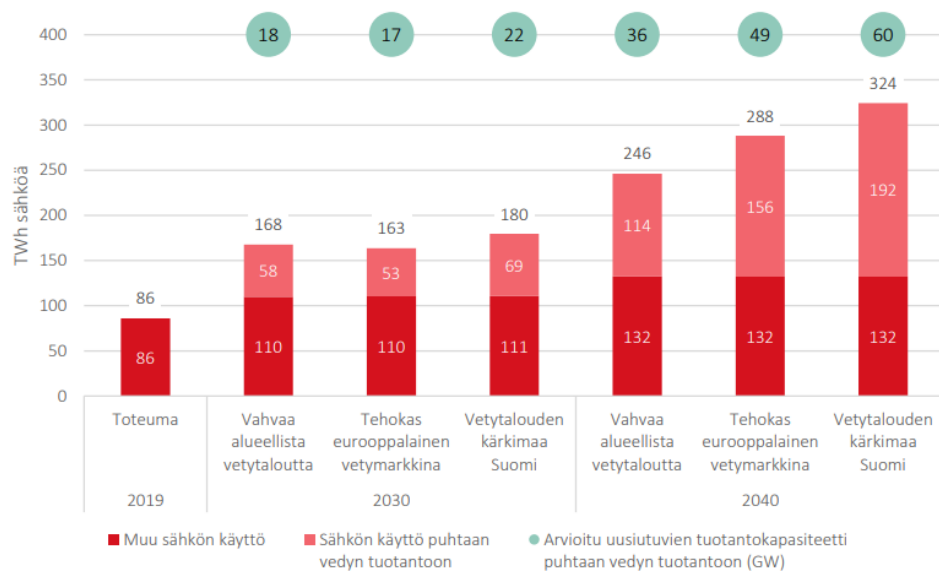
Kuvassa 17 on Fingridin tarjoama yksi vaihtoehtoinen skenaario, miten sähkön tuotanto kehittyisi tulevaisuudessa vetytalouden ajamana. Suomen ollessa vetytalouden kärkimaa, sähkönkulutus olisi kolmin- tai nelinkertaistunut ja yli puolet sähköstä käytettäisiin vedyn tuotantoon.⁵³

⁵⁰ Mine storagen kaupallisen johtajan ja perustajajäsenen Raine Vasanoja kanssa käyty tiedonvaihto ja Mine Storage tietoja

⁵¹ Yle vetyhanke kartta

⁵² Tuulivoimahankkeet tällä hetkellä Suomessa, tuulivoimayhdistys.

⁵³ Fingridin tekemiä skenaarioita miten vedyn tuotanto vaikuttaa Suomen sähkönkulutukseen.

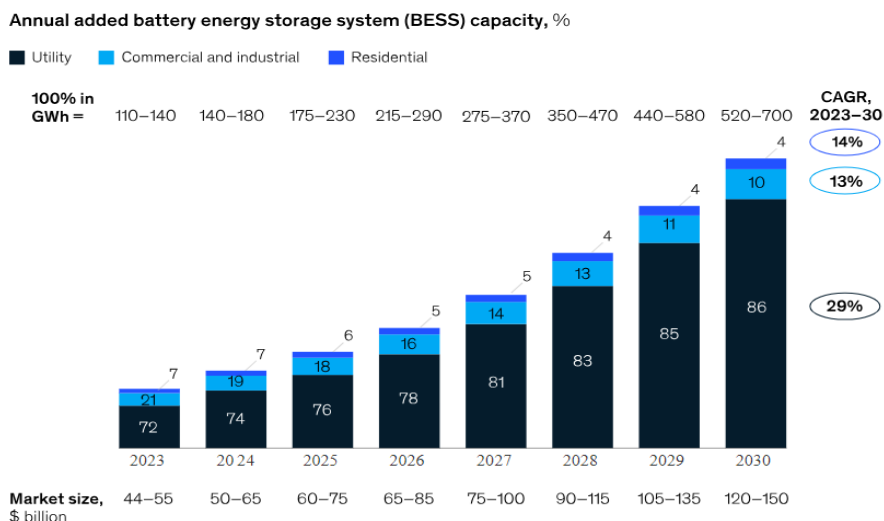


Kuvio 17. Fingridin skenaario vedyn tuotannon ja sähköntuotannon tulevaisuudesta.⁵⁴

BESS eli battery energy storage system on yksi ratkaisu inertiahaasteen päihittämiseen, mutta se toimii myös tuuli- ja aurinkotuotannon hetkelliseen varastointiin. BESS:n varastointikapasiteetti globaaleilla markkinoilla on tällä hetkellä kuvan 18 mukaan 110–140 GWh. Vuonna 2030 varastointikapasiteetti olisi saman lähteen mukaan 520–700 GWh.

⁵⁴ Fingrid sähköjärjestelmävisio 2023

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



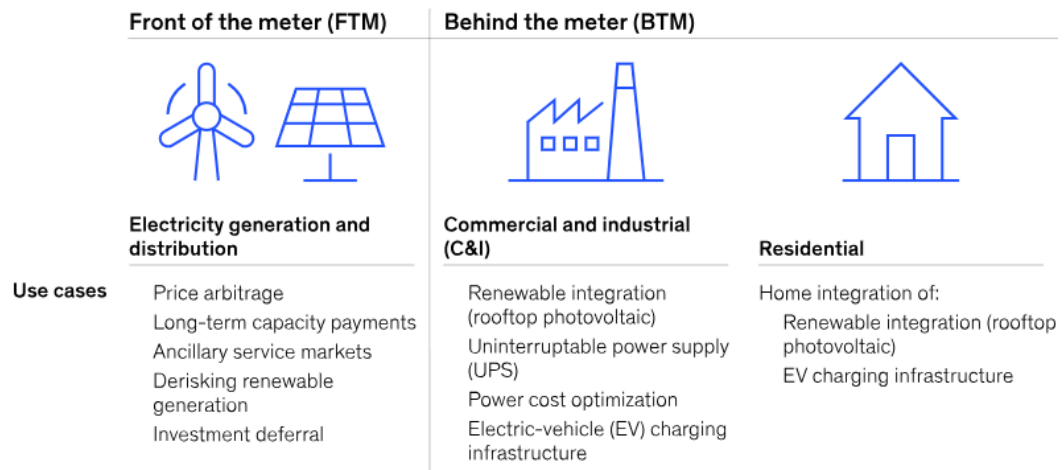
Kuvio 18. McKinsey energy storage insights BESS market model.⁵⁵

Suomi hyötyy BESS:n energiavarastoinnista saamalla energian tuotannosta mahdollisimman tehokkaan, sekä joustavan sähköjärjestelmän. Tällä hetkellä tuulivoimaa myydään heti kun se tuotetaan, mutta BESSien avulla tuotannosta voidaan osa varastoida halvalla hinnalla ja käyttää sitä kantaverkon taajuuden ylläpitoon tai suuremman tuotanto portfolioon vakauttajana.

Nykyiset litiumioni BESSit voivat purkautua täydellä teholla 4–6 h, jolloin saadaan ID eli päivänsisäisille markkinoille halpaa sähköä. ID-markkinoilla hinnat voivat vaihdella DAM hinnoista paljon, eli hinnat voivat nousta ID-markkinoilla DAM-hintoihin verrattuna, jolloin kysyntä on noussut tai tarjonta on laskenut paljon. Tässä tapauksessa halpaa varastoitua tuulivoimaa voitaisiin hyödyntää ID-markkinoilla.⁵⁶

⁵⁵ McKinsey Enabling renewable energy with battery energy storage systems

⁵⁶ BESS varastointiaika



Kuvio 19. McKinsey energy storage insights missä BESS voidaan hyödyntää.⁵⁷

BESS-varastoja voidaan hyödyntää energian tuotannon, jakelun ja käytön sektoreilla. Kuvassa 19 on lueteltuna kohteita, joissa BESS on hyödyllinen optimoinnin työkalu. FTM Front of the meter, eli BESS on hyödyllinen hinta heittelyissä, säähajaisen tuotannon riskien poistossa ja tuotannon sekä jakelun toiminnan tukemisessa. Ladataan BESS halvalla tuuli- tai aurinkovoimalla ja tasapainoitetaan sähkövoima järjestelmää varastolla tarvittaessa etenkin, jolloin kysyntä ei vastaa tuotantoa. Sähajaisen tuotannon riskien poistolla tarkoitetaan sitä, kun tuulivoiman puuttuva tuotanto voidaan korvata BESSin avulla.

BTM behind the meter, eli käyttäjien hyödyt BESSistä. Katkeamattoman energian saannista hyötyvät yksityiset ja teolliset toimijat, esimerkiksi sähköautojen latausinfrastrukturi toimii BESSin avulla käyttökatkon aikana. BESSiä voidaan hyödyntää esimerkiksi sairaaloissa tai tärkeissä julkisissa laitoksissa, joissa tarvitaan jatkuvaa sähköä. Aukkaat, jotka hyödyntävät BESSiä, voivat käyttää varastoa aurinkovoiman varastointiin tai sähköauton lataamiseen.⁵⁸

⁵⁷ McKinsey Enabling renewable energy with battery energy storage systems

⁵⁸ McKinsey BESS käyttökohteet

PHS-laitoksissa yleensä käytetään Francis- ja Pelton-mallisia turbiineja, valintaan vaikuttaa putouskorkeus ja tilavuusvirran suuruus. Tarkastellaan tässä työssä tarkemmin Pelton-turbiineja. Kuvassa 21 on Pelton turbiinien osat, joiden avulla sen tehokkuus erottuu muista malleista, turbine runner ja kauha. Pelton-turbiinin tehokkuus on yli 90 %, kahtia jaetun kauhan ansiosta. Jaettu kauha jakaa veden kahteen osaan, jolloin veden poistuminen kauhasta on tehokkaampaa ohjautuen oikeaan suuntaan. Ilman jakajaa vesi roiskuisi takaisin tulosuuntaansa osuen yllä olevaan kauhaan ja luoden vastavoimaa. Kauhassa olevan jakajan ylläpito on tärkeää Pelton-turbiinin tehokkaalle toiminnalle. Jakajaa on teroitettava huolloissa, jottei jakajien kärjet levene ja aiheuta kitkaa.^{61 62}



Kuvio 21. Pelton-turbiinin kehä ja jaettu kauha.^{63 64}

Hyötysuhde laitoksilla on yleisesti ottaen yli 70 %, kun häviöt otetaan huomioon koko prosessissa. Veden haihtuminen yläaltaassa, vuodot putkistossa ja turbiinilla sekä virtaavan veden aiheuttama kitka putkistossa. Kuvassa 22 nähdään mistä

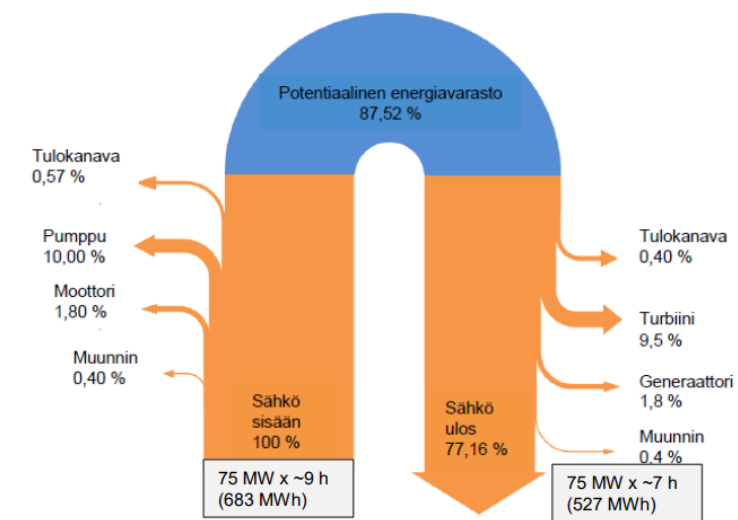
⁶¹ Wagner HJ introduction to hydro energy systems

⁶² Richard Hammond How the Turbines in the Kölnbrein Dam are 92% Efficient Video

⁶³ Savreen kirjoitus pelton turbiinista

⁶⁴ Savreen kirjoitus pelton turbiinin kauhasta

häviöitä syntyy, kun huomioidaan sähkölaitteet ja muut toiminnalliset häviöt. Pumpun käytössä syntyy 11.4 % häviöitä ja turbiinin käydessä 8.8 %.



Kuvio 22. EPV Energia -esitys: UPHS, arvioidut häviöt latauksessa ja purussa.⁶⁵

PHS-laitokset ovat yleisesti rakennettu suurella budjetilla kallioon ja hyödynnetty ylöspäin nousevaa korkeuseroa, tämän työn tarkastelun kohteena on yksi maailman näkökulmasta uniikkeimmasta hankkeesta. Sillä voimalaitosta on suunniteltu rakennettavaksi vanhaan toimintansa lopettaneeseen kaivokseen. Tarkat tekniset tiedot ja ominaisuudet ovat kappaleessa 5.1. Työn aikana keskustelin Ruotsalaisen yrityksen Mine Storagen kaupallisen johtajan sekä perustajajäsenen Raine Vasanojan kanssa, Yritys toimii maanalaisten vesivoima hankkeiden kehittäjänä.

Keskustelimme laitosten vastaanotosta mediassa, hankkeista, sijoittamisesta ja kannattavuudesta. Tuotannon kannattavuus riippuu volatilitetista, tuottovaatimuksista ja tuotantostrategiasta. Laitoksen kapasiteetista käytetään osa energiakauppaan, jolloin eroavaisuuden ei tarvitse olla suuri. Laitoksella

⁶⁵ Pyhäsalmen pumppuvoima hankkeen päällikön Aki Hakulisen julkinen esitys hankkeesta

käytetään osa energiakauppaan riippuen mistä maantieteellisestä markkinasta on kyse. Pohjoismaissa potentiaali on lyhyellä aikavälillä tasehallintamarkkinoissa.⁶⁶

3.1.1 Maanalainen pumppuvoimalaitos

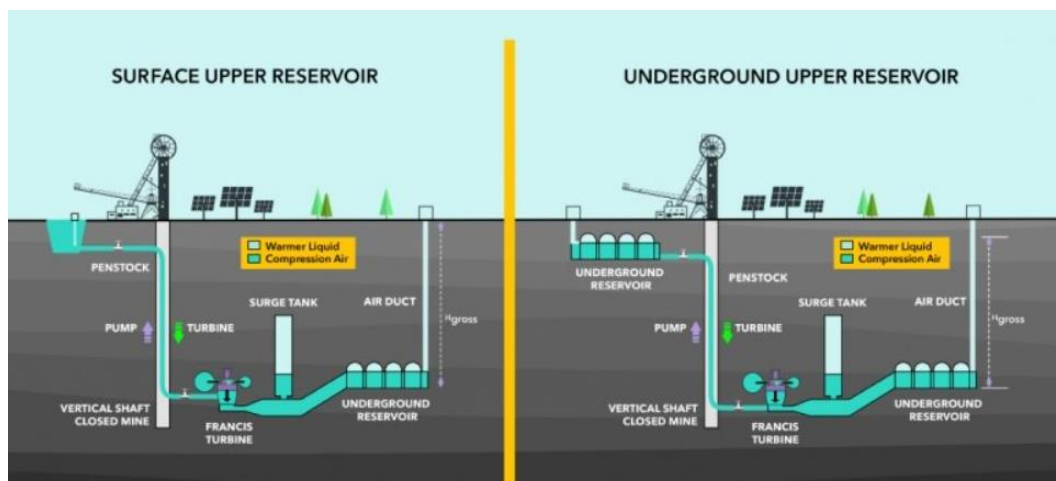
PUSH eli Pumped Underground storage hydro, toimintansa lopettaneisiin kaivoksiin asennettava pumppuvoimala. Michigan State University tutkimuksen ja kuvan 23 mukaan käytetään avo- ja maanalaisialouhoksia, joissa asennettavien pumppuvoimaloiden toimintaperiaate on täysin sama. Vanhan kaivoksen kuljetusreitit hyödynnetään uuden pumppuvoimalaitostoiminnan aloittamisessa. Vielä ei ole yhtään maanalaista pumppuvoimalaa käytössä, joten se hankaloittaa datan hankintaa kustannuksiin. Kannattavaan toimintaan tarvitaan teknillisen kannattavuuden tarkastelu, sijoituksen arvioitu kustannus ja muuttuvat kustannukset sekä liikevaihdon tuoton potentiaalinen arvio tarjottavilta markkinoilta. Jokaisen osa-alueen on toteuduttava ja oltava kannattava, muuten hanke ei tule olemaan kannattava investointi.

Teknillisen, investoinnin ja tuloksen kannattavuuksien tarkasteluiden lisäksi voimalaitoksen on saatava hyväksyntä alueen kansalaisilta sekä YVA- ja ELY-hyväksynät.

PUSH:n toiminnan periaate on täysin samanlainen kuin traditionaalisissa vesivarastoissa. Ylitarjonnan aikaan sähköä käytetään siirtämään vettä alareservistä yläreserviin, sähkön kysynnän ollessa suuri yläreservistä juoksetetaan vettä alareserviin generaattorin läpi tuottaen sähköä verkkoon. Pitkien pudotuskorkeuksien ansiosta mahdollistetaan alhainen virtausnopeus ja pienemmän altaan koko, myös korkean vesipatsaan avulla veden ulostuloa voidaan pienentää, tehostaen saatavaa hyötyä ylävarastoa purkaessa.⁶⁷

⁶⁶ Mine Storagen kaupallisen johtajan ja perustajajäsenen Raine Vasanojan kanssa käyty keskustelu 12.6.2023.

⁶⁷ "Pyhasalmen-pumppuvoimalaitos-Julkinen_AkiHakulinen.pdf".



Kuvio 23. Kaksi erilaista maanalle sijoitettavaa pumppuvoimalaa.⁶⁸

Veden laadun täytyy olla puhdasta, koska saastunut vesi aiheuttaa kulumista turbiinissa. Vakavin ongelma on, että pystysuorasta siilosta tippuu kiviainesta, tämä ohitetaan asettamalla kiviansa siilon pohjalle. Putki tekee 90 asteen kulman, jolloin tippuva kiviaines tippuu kiviansaan eikä aiheuta ongelmia turbiinissa. Veden käyttäminen vanhoissa kaivoksissa tuo esiin riskejä, koska veteen voi liueta vaarallisia aineita. Veden täytyisi olla joko täysin eristettynä omassa kierrossa tai sitä suodatettaisiin ja puhdistettaisiin, jolloin siitä ei tulisi mahdollisia ympäristöhaittoja.

Maanalaisten pumppuvoimalaitosten riskit ovat suuret, mutta toteutuessaan niiden potentiaali voittaa riskien uhat. Investoinnin kannattavuutta täytyy tarkastella nykyisellä markkinahetkellä pitkällä aikajaksolla, koska pohjoismaiden energiamaarkkinat tulevat vahvasti pohjautumaan tuuli ja aurinkovoimaan, jolloin säätövoimaan tarvitaan paljon kapasiteettia. Vanhojen ja sopivien kaivosten hyödyntäminen on yksi uusi vesivoiman tuotanto ja kulutusmuoto, jota tullaan hyödyntämään maailmanlaajuisesti 20 vuoden kuluttua.

⁶⁸ MTU tutkimukseen tehty havainnollistama kuva.

3.1.2 Pyhäjärven pumppuvoimalaitos hanke

Pyhäjärvellä sijaitsee Pyhäsalmen kaivos, joka on Euroopan syvin kaivos. Kaivokselle etsitään aktiivisesti jatkokäyttöä kaivostoiminnan loppumisen myötä. Kaivos on aloittanut toimintansa vuonna 1962 ja malmivarat ovat louhittu loppuun syksyllä vuonna 2022. Louhinnan loputtua kaivos jatkaa maanpäällisellä rikastustoiminnalla vielä muutaman vuoden ja maanalaisen kaivoksen sulkemistoimenpiteillä niiltä osin, jotka eivät ole mukana jatkokäyttösuunnitelmissa. Yksi ja isoin jatkokäyttösuunnitelma on pumppuvoimalaitoksen rakentaminen kaivokseen 1,5 km syvyyteen.⁶⁹

Energian tuotannon muututtua sääriippuvaisen tuotannon kasvun myötä sekä perinteisten fossiilisten lauhdelaitosten poistuttua tuotantoportfoliosta on sähkön markkinahintojen heittely yleistynyt ja kasvanut hyvin voimakkaasti. Tämä muutos edellyttää sähkön säätö- sekä varastointi kapasiteetin kasvattamista.⁶⁹

Konsulttiyhtiö Pöyry, nykyinen AFRY, on tehnyt kannattavuuslaskelman vuonna 2017 Pyhäsalmen kaivoksesta, jossa on selvitetty neljä eri koko vaihtoehtoa kaivokseen sijoitettavasta pumppuvoimalaitoksesta. Selvityksen kokovaihtoehdot ovat 75 MW, 2 x 75 MW, 100 MW ja 2 x 100 MW.⁶⁹

EPV Energia Oy aloitti vuonna 2021 keväällä Pöyryn tutkimuksen perusteella pumppuvoimalaitoshankkeen selvityksen yhdessä AFRY:n kanssa. Hankeselvitys sisälsi esisuunnittelua louhinnan ja tekniikan osalta, hankkeen kokonaisuuden jakamista osiin, tarjouskyselyaineistojen tekoa ja tarjousten vertailua, tarvittavia neuvotteluja tavara- ja palvelutoimittajien kanssa sekä lupien hakemisen.⁶⁹

EPV Energian selvitys pumppuvoimalaitokselle tehtiin yhdellä 75 MW pumpputurbiinilla. Pumpputurbiinin tekniikka on koeteltua tekniikkaa ja poikkeuksellisen hankkeesta tekee laitoksen sijoittaminen 1,5 km syvyyteen vanhaa kaivosta käyttäen apuna. Ylävarasto tehdään vanhaan raakkukivilouhokseen, josta louhitaan 1 km mittainen horisontaalinen tunneli vertikaaliselle painevesikuilulle. Painevesikuilun halkaisija on 2,5 m ja syvyyttä

kuilulla on 1,5 km johtaen turbiinille. Kokonaisvesitilavuus on 180 000 m³ ja maksimivirtaus 6 m³/s. Isolla pudotuskorkeudella mahdollistetaan pienellä veden virtaamalla kohtuullisen iso teho. Konehuone sekä alavesialtaat louhitaan myös tunneleiden tavoin olemassa olevan kaivoksen tunneleiden ja kaivoksen ulkopuoliseen kallioon.⁶⁹

Konehuoneeseen sijoitetaan samalle akselille generaattori, Pelton-turbiini, kytkin sekä pumppu. Myös tarvittavat apulaitteet sekä 110 kV päämuuntajat 3 kpl yksivaihe muuntajia, joilta sähkönsiirtokaapelit viedään olemassa olevan hissikuilun seinämää pitkin GIS-asemalle, joka sijaitsee maanpinnalla. GIS- asemalta 110 kV:n kaapelit viedään maakaapeleina n. 3 km päähän paikallisen sähköyhtiön kytkinkentälle.⁶⁹

Tuotantoaika kyseiselle laitteelle on 7 tuntia ja latausaika 9 tuntia. Järjestelmässä on ainoastaan yksi pumppu, jolla vesi siirretään alavesialtaista ylävesialtaaseen samaa vesitietä pitkin kuin tuotantoajossa vesi johdetaan turbiinille.⁶⁹

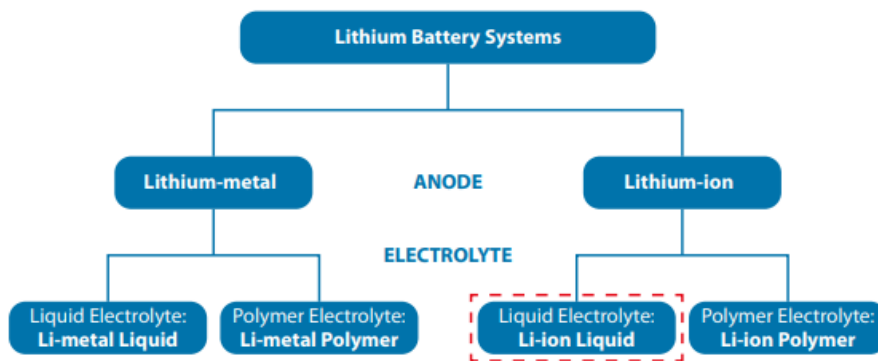
3.2 Teollisenmittaluokan akkuvarastot

Suurin osa tutkimustoiminnasta keskittyy nykyään litiumpohjaisten akkujen parantamiseen tehokkuuden ja eliniän pidentämiseen, jotka Sony toi kaupallisille markkinoille 1990-luvulla. Vuonna 2019 John B. Goodenough, Akira Yoshino ja Stanley Whittingham palkittiin kemian Nobel-palkinnolla, heitä pidetään litiumioni-akkujen keksijöinä.⁷⁰ Li-ioniä käytetään matkapuhelinten, kannettavien tietokoneiden, digitaalikameroiden, sähkötyökalujen ja lääkinnällisten laitteiden lisäksi myös sähköajoneuvoissa ja satelliiteissa. Akulla on monia etuja, joista tärkeimpiä ovat korkea ominaisenergia, helppo lataaminen ja vähäinen huoltotarve⁷¹

⁶⁹ Pyhäsalmen pumppuvoiman hankepäällikön Aki Hakulisen kommentti hankkeesta.

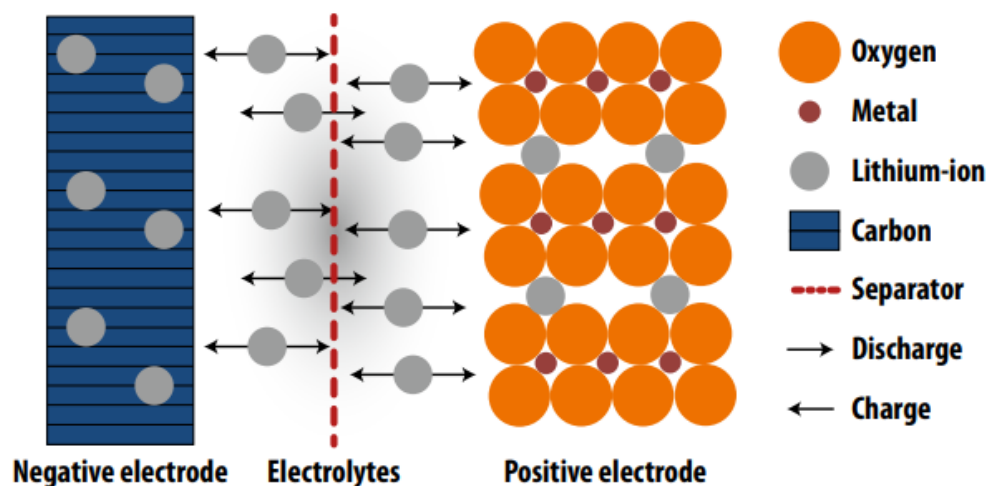
⁷⁰ John B. Goodenough Li-ion akkujen yksi keskijöistä.

⁷¹ Invention of the rechargeable battery



Kuvio 24. Työn aikana tutkittiin ympyröityä akkutyyppejä.⁷²

Kuvassa 24 olevan litium-ioni-akkujen toiminta perustuu REDOX-reaktioihin eli hapettumis-pelkistymisreaktioihin katodilla ja anodilla. Litium-ioni liikkuu katodin ja anodin välillä aiheuttaen elektronin liikettä katodilla ja anodilla, elektroni liikkuu ulkoista johdinta pitkin. Latauksen aikana litium-ionit ovat katodilla, kun varaustila on matala. Varaustilan kasvaessa litium-ionit liikkuvat elektrolyytin ja separaattorin läpi anodille samalla vapauttaen elektronit ulkoista johdinta pitkin. Elektronit sitoutuvat katodilla ja anodilla materiaaleihin ja energiaa muodostuu, kun elektronit sitoutuvat ja vapautuvat.⁷³



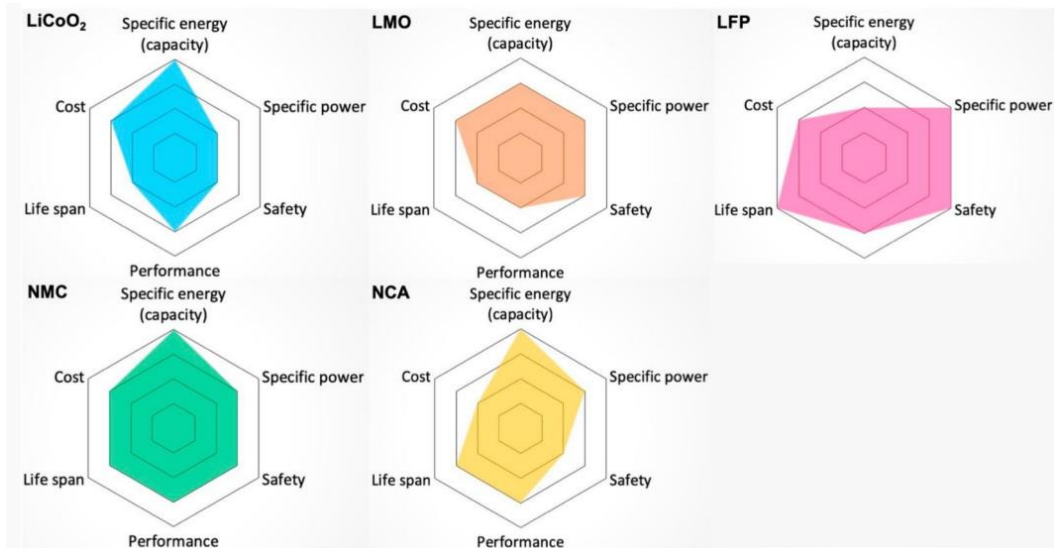
Kuvio 25. Toiminnan ylläpitämiseen vaadittavat pääkomponentit.⁷⁴

⁷² IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030

⁷³ "How Lithium-ion Batteries Work | Department of Energy."

⁷⁴ IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030

Purun aikana litium-ionit liikkuvat takaisin katodille elektrolyytin ja separaattorin läpi vapauttaen sitomansa elektronit ulkoisen johtimen kautta, prosessista pelkistetyn kuvan 25 mukaisesti. Sähköautojen akun kemiallinen toiminta on samanlaista kuin BESSillä, eli REDOX-reaktioiden tapahtumista ja suurien litium-ioni määrien liikuttamisesta. BESSissä täytyy huomioida vielä tärkeämmin jäähdyttäminen, sijainti, olosuhteet ja oikea käyttö, koska varastosta halutaan mahdollisimman suuri hyöty irti pitkällä aikavälillä.



Kuvio 26. Eri katodimateriaalien vahvuuksia ja heikkouksia.⁷⁵

Litiumkoolttioksidi (LCO), joka esiteltiin alun perin 1980-luvulla, oli Sonyn alkuperäisen Li-ion-akkusuunnittelun aktiivinen materiaali. Kyseisellä materiaaliyhdistelmällä on huomattavasti suurempi energiatiheys kuin muilla Li-ion-tyypeillä, vaikka sillä on haittoja kuten lyhyt käyttöikä, rajoitettu latausnopeus ja kohtalainen lämpöstabiilisuus. Ominaisuuksien vuoksi sen käyttö rajoittuu tällä hetkellä lähes yksinomaan tietokone-, kulutuselektroniikka- ja viestintämarkkinoille, joilla energiatiheys on ensiarvoisen tärkeää. LCO-akkuja ei tyypillisesti käytetä kiinteiden sovellusten markkinoilla, kuten suurissa akkuvarastoissa.

⁷⁵ Juho Heiska opetusmateriaali VAMK akku kurssi

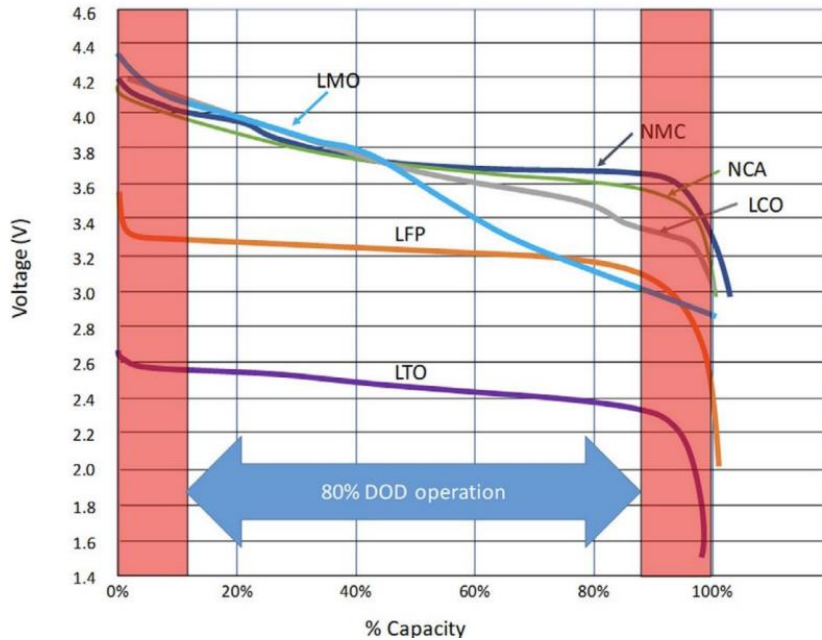
Nikkeli-mangaani-koboltti (NMC) -kennot ovat yleinen valinta. kiinteissä sovelluksissa ja sähköautoteollisuuden alalla. NMC kennot ovat kehittyneet LCO-konseptista, tämäntyyppiset kennot syntyivät tutkimuksesta, jossa pyrittiin kustannussyistä yhdistämään kobolttia muihin halvempiin metalleihin säilyttäen samalla rakenteellinen vakaus. Kuvan 26 mukaan NMC on vahva yleisesti, joka alueella ja kapasiteetti on yksi parhaimmista katodikemioista.

Ensimmäisistä LCO-kennoista kehitettiin katodimateriaaleja, joilla on sama kiderakenne mutta joissa käytetään nikkeliä koboltin sijasta. Nämä litium-nikkeli-oksidi kemiaan (LMO), perustuvat kennot hyötyvät suuremmasta energiatiheydestä ja alhaisemmista kustannuksista verrattuna varhaisiin kobolttipohjaisiin rakenteisiin. Niiden haittapuolena ovat mahdollisesti esiintyvät litiumin diffuusio-ongelmat. Pienten alumiinimäärien lisääminen niihin on kuitenkin parantanut niiden sähkökemiallisia ja lämpöstabiilisuuksominaisuuksia ja säilyttänyt samalla joitakin muita etuja.

Alumiinin lisääminen on johtanut litium-nikkeli-koboltti-alumiini (NCA) akku kemioiden yleistymiseen ja niiden lisääntyneeseen käyttöön liikkuvuusmarkkinoilla, erityisesti Teslan sähköautoissa. NCA-kennoihin perustuvissa varastointijärjestelmissä käytetään yleensä NCA-katodia, jossa on 5 % alumiinipitoisuus. NCA-kennojen ja niiden BES-järjestelmien energiatiheys on suurempi kuin NMC-pohjaisten Li-ion-akkujen, ja niiden lisäetuna on, että alumiini lisää suorituskykyä ja on kobolttia kustannustehokkaampi. NCA-kennojen korkeajännitetoiminta johtaa elektrolyyttien hajoamiseen, ja tämän haasteen ratkaiseminen jatkuu edelleen. Jos tämä onnistutaan ratkaisemaan, se voi lisätä NCA-pohjaisten BES-järjestelmien käyttöä muissakin sovelluksissa kuin sähköautoissa.

Litium-rautafosfaatti (LFP) -kemialla takaa paremman lämpöstabiilisuden verrattuna muihin li-ionikennoihin, ja vaikka ne vaativat edelleen yhden kennon hallintajärjestelmiä, LFP-kennoja voidaan markkinoida luonnostaan turvallisina. LFP:llä on suhteellisen suuri tehokapasiteetti, ympäristöetuna edullisesta ja

myrkyttömästä katodimateriaalista ja pitkästä käyttöiästä. Nämä ominaisuudet sekä suhteellisen alhainen purkautumisnopeus tekevät LFP BESS -järjestelmänä erittäin houkuttelevan teknologia kiinteisiin sovelluksiin.⁷⁶



Kuvio 27. Lataussyklin syvyysprosentti katodikemioilla, Depth Of Discharge.⁷⁷

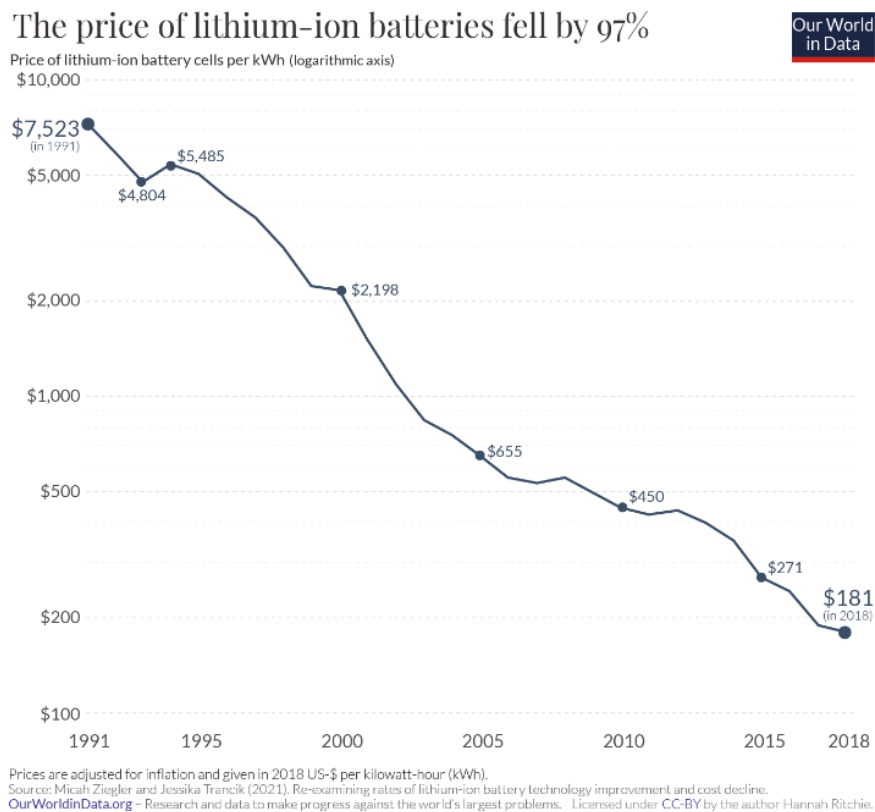
Katodilta halutaan mahdollisimman tasainen ja korkea jännitteen purkautuminen, joten kuvan 27 mukaan LFP- ja LTO-katodien käyrä on kaikista kannattavin, vaikkakin jännite tippuu nopeasti kapasiteetin oltaessa lopussa. NMC- ja NCA-katodin korkea jännite ja tasainen käyrä on myös niiden suosion yksi tekijöistä. LFP on kuitenkin kaikista näistä kaikista tasaisin ja siihen vielä turvallisuus, jolloin siitä saadaan BESS-varastoon hyvä kemia.

Kaupallistamisen jälkeen on löydetty hintaa mullistavia tekniikoita, joiden ansiosta nykyinen hinta litium-ioni-akuille on laskenut jopa 97 % vuoden 1991 hinnoista. Suurten BESS MWh:n kokoluokan akkuvarastojen kemiat eroavat kaupallisessa käytössä olevista kWh:n kokoluokan akustoista. Tehon ulostulo vaihtelee,

⁷⁶ "2030 - Electricity storage and renewables Costs and mark.pdf". sivu 63-81

⁷⁷ Juho Heiska opetusmateriaali VAMK akku kurssi

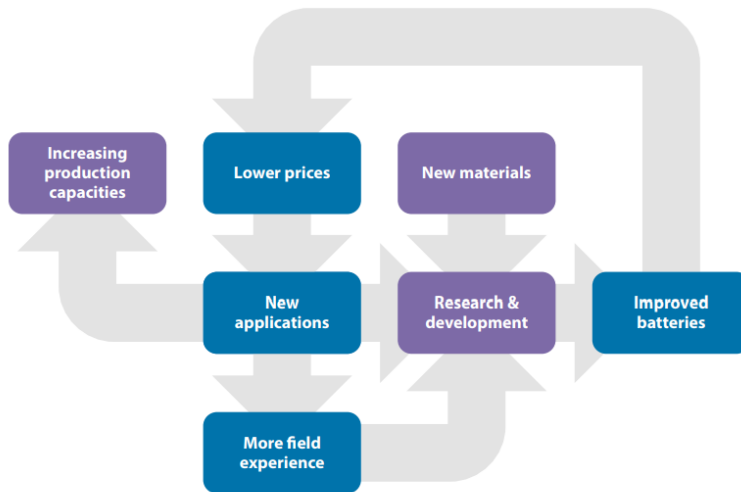
kapasiteetit ovat suuremmat isoissa varastoissa, suunniteltu joko kaupalliseen käyttöön tai kantaverkon toimintaa tukeviin toimiin, skaalattavuus on kaupallisissa hyvä ja teollisissa se vaatii paljon investointia ja kehittämistä.



Kuvio 28. Akkujen hintojen lasku kaupallistamisen jälkeen.⁷⁸

Suuret akkuvarastot MWh:n kokoluokkaa, ovat investoinniltaan kalliita. Esimerkkinä 1 MW/1 MWh:n akkuvarasto maksaisi kuvan 28 mukaan pelkästään akustolta 181 000 euroa, tähän ottaen kaikki muut investoinnit suurissa teollisen mittakaavan varastoissa voidaan olettaa, että loppuinvestointi tulee maksamaan lähelle 500 000 euroa. Fortumin blogissa on tehty esimerkki samankokoisesta akusta, jonka hinta olisi 500 000 euroa. Syklejä arvioidaan tapahtuvan käyttöä aikana 5000 kappaletta, joten yksi sykli maksaisi 100 euroa. Vuonna 1991 samanlaisen akuston hinta olisi ollut 7.5 miljoonaa euroa.

⁷⁸ Our world in data battery price decline



Source: International Renewable Energy Agency.

Kuvio 29. Akkuteknologian edistymisen vaikutus hinnoitteluun.⁷⁹

Akkujen hintoja ennustetaan laskevan vielä entisestään tulevaisuudessa ja kuvan 29 mukaan se tapahtuu, uusien ominaisuuksien ja sovellusten kautta sekä kenttäkokemuksen kautta. Näiden rinnalla toimii tutkimus- ja kehittämistyö uusien materiaalien kanssa. Uusien ja kehittyneiden akkujen avulla hinnat laskevat ja sama sykli jatkuu, kunnes uusien innovaatioiden löytäminen on mahdotonta. Uusimman julkistetun innovaation avulla lataus ja purkaus syklien määrät voisivat nousta jopa satoihin tuhansiin.⁸⁰

Li-ion-akkujen kustannukset ovat laskeneet nopeasti viime vuosina. Merkittävimmiksi tekijöiksi voidaan nostaa teknologinen kehittyminen sekä markkinoiden kasvu, jossa suurimpana ajurina ovat toimineet sähköautot. Vuonna 2022 koettiin ensimmäistä kertaa historiassa kuitenkin tilanne, jossa keskiarvoisen litiumakun tuotantohinta €/kWh ei laskenut edellisen vuoden vertailutasosta. Syynä tähän nähtiin inflaation voimakas nousu sekä kysynnän kasvu erityisesti sähköautoissa. Tulevaisuudessa Li-ion-akun kustannusten uskotaan edelleen laskevan merkittävästi, mikä lisää globaalia kapasiteettilisäystä moninkertaisesti. Huomattavin osa kasvusta tapahtuu edelleen sähköautojen puolella, mutta myös

⁷⁹ IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030

⁸⁰ UCI doctoral candidate Mya Le Thai has developed a nanowire-based technology that allows lithium-ion batteries to be recharged hundreds of thousands of times

sähköverkkopuolen varastointikapasiteettitarpeet lisäävät kysyntää, kuten viime vuodet ovat jo osoittaneet.⁸¹

Sääpohjainen tuotannon myötä sähkökemiallinen energianvarastointi on yleistynyt. Sen takia markkinahinnoissa nähdään suuriakin heittoja, jolloin varastoidulle energialle saadaan parempi kate. Vuonna 2020 Pohjoismaiden suurin 30 MW:n akkuvarasto rakennettiin Suomeen Etelä-Karjalaan lähelle Lappeenrantaa, Yllikkälään.⁸² Yllikkälän akkuvarasto toimi yhtenä järjestelmäsuojan lähteenä TVO:lle, kun Olkiluoto 3 otettiin käyttöön 2022 Joulun ja 2023 kevään aikana. Yllikkälän akkuvarasto pystyi syöttämään koko kapasiteettinsa Suomen kantaverkkoon 200 millisekunnissa, jos OL3 tippui verkosta suunnittelematta.⁸³

Sen sijaan, että energiantuotanto yhtiöt investoisivat uusiin maakaasuturbiineihin sähköntuotantotarpeiden täyttämiseksi sähkönkulutuksen huipputunteina. Yhtiöt voisivat maksaa tai hakea tarpeensa muista hyödykkeistä, kuten energian varastoinnista akkuihin, siirtääkseen tai vähentääkseen uuden tuotantokapasiteetin tarvetta ja minimoidakseen riskin liiallisista investoinneista alalla.

Yleishyödyllisten laitosten, kuten vesi-, sähkö-, posti-, ja televiestintäpalveluista ja liikenneinfrastruktuurista investointien viivästyttäminen tai pienentäminen tunnetuilla suuren kuormituksen alueella. Tämä mahdollistaa investoinnit jakeluverkon parantamiseen tai varastoinnin vaihtoehtoihin.⁸⁴

Minimoimalla sähkön ostot sähkönkulutuksen huipputunteina, jolloin käyttöaikakorvaukset ovat korkeimmat ja siirtämällä nämä ostot alhaisempien

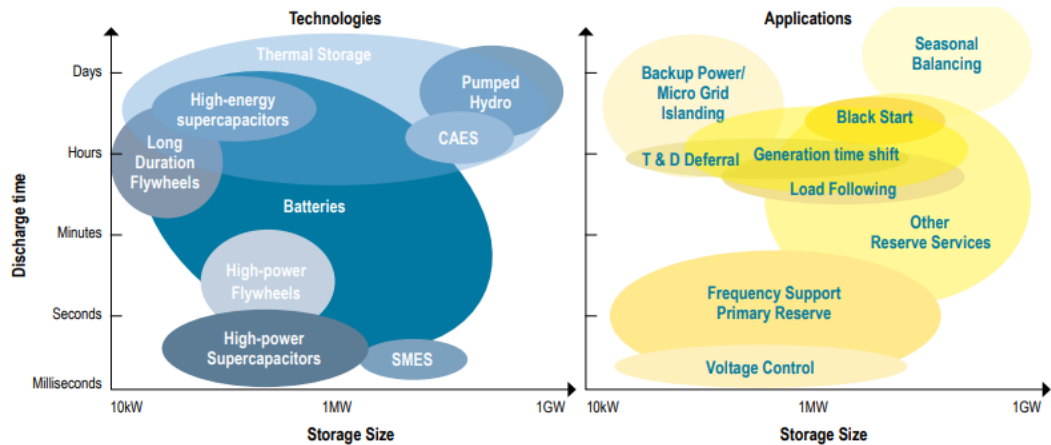
⁸¹ EPV Akkuhybridin toimitusjohtaja Niko Topparin kommentti akkuvarastoinnin hintakehityksestä

⁸² "Neoen rakentaa Suomeen Pohjoismaiden suurimman akkuvaraston - Neoen".

⁸³ "Neoenin akkuvarasto toimittaa nopeaa varavoimakapasiteettia TVO:lle - Neoen".

⁸⁴ Investointien tarkoitukselliset viivästyttämiset

hintojen aikoihin, asiakkaat voivat käyttää energian varastointijärjestelmiä laskujensa pienentämiseksi.⁸⁵



Kuvio 30. Hahmotelma mihin akkuja voidaan käyttää varastoinnissa.⁸⁶

Kuvan 30 mukaisesti akkuja voidaan hyödyntää monessa eri tarkoituksessa, jotka liikkuvat 10 kW:n ja 100 MW:n välissä. Käyttöaika vähenee huomattavasti mitä suurempia varastointi kapasiteetteja tarkastellaan. Akkujen toiminta skaalautuu päivän jaksoisesta varastoinnista jopa millisekuntien pituisiin varastointeihin. Ääripää esimerkkeinä ovat thermal storage ja High power flywheels. Thermal storage voivat ylläpitää suuria ja pieniä määriä tehoa päiviä, kun taas Flywheel voi tuottaa varastoimaan tehoaan muutamia sekunteja. Flywheel toimii taajuuskontrollinnissa ja thermal storagen aikakausien tasehallinnan tai lämmön tarpeen tasapainottamisessa. Kuvan 30 mukaan PHS ei kykenisi toimimaan taajuuden tuennassa, vaikka yleisesti laitosten vastinaika on kuitenkin tarpeeksi lyhyt toimimaan taajuuden tuennassa.

⁸⁵ The economics of BESS how to multi-use, customer sited batteries deliver the most services and value to customer and the grid

⁸⁶ "Energy Sector Management Assistance Program - 2020 - Deploying Storage for Power Systems in Developing .pdf". sivu 12

4 LIIKEVAIHTOON JA TARJONTAMALLEIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kappaleessa esitetyt tarjontamallit ovat omaa ajatustyötä, eikä niillä ole yhteistä EPV Energian olemassa olevien tarjontamallien kanssa. Ennen liikevaihdon tarkastelua on tärkeä osata markkinoiden maksettavien korvauksien logiikat sekä kulut, jotka vaikuttavat liiketulokseen. UPSH- ja BESS-varastoinnin kannattavuus perustuu halvalla varastoidun energian myyntiin kalliilla tai osallistumalla hyvin tuottavaan reservimarkkinatuotteeseen riittävän isolla kapasiteetilla. UPHS-varaston kannattavuus perustuu myös markkinahintojen vaihteluun

Fingridin reservimarkkinoilla sopimuspuolilla on oikeus ylivoimaisen esteen sattuessa rajoittaa reservien ylläpitoa tai keskeyttää se kokonaan. Ylivoimaiseksi esteeksi katsotaan sellainen este, joka ei ollut sopimuspuolten tiedossa sopimusta tehtäessä ja jota sopimuspuoli ei ole voinut estää tai jonka vaikutuksia ei ole voitu välttää kohtuulliseksi katsottavilla toimilla, ja joka tekee sopimuksen mukaisen reservien ylläpidon mahdottomaksi tai vaikeuttaa sitä olennaisesti tai tekee sen muuten kohtuuttomaksi. Ylivoimaisen esteen aikana FG ei maksa korvauksia ja sanktioita ei kohdistu reservitoimittajille.⁸⁷

4.1 Tulot

Varastot saavat korvausta, kun niiden kapasiteettia tarjotaan eri markkinoille. Tarkoituksena on tietää näiden eri markkinoiden korvauslogiikat, jotta tarjontamalleista saataisiin mahdollisimman optimoituja.

4.1.1 Fingridin tuotteiden korvaukset

FCR (taajuuden vakautusreservit): Korvaukset perustuvat joko FCR-tuntimarkkinahintaan tai FCR-vuosimarkkinahintaan, ja laskentakaava on

$$\text{Kapasiteettikorvaus (€)} = \text{Ylläpidetty reservikapasiteetti (MW,h)} \times \text{FCR-}$$

⁸⁷ Fingrid reservituotteen ehdot toimittajalle, kappale ylivoimainen este.

markkinahinta (€/MW,h) - Sanktiot (€). Osallistuessaan sekä tunti- että vuosimarkkinoille, korvaukset lasketaan erikseen kullekin markkinalle.

D-2-FCR (taajuuden vakautusmarkkinat) tuntimarkkinat: Korvaus perustuu D-2-FCR-tuntimarkkinahintaan ja laskentakaavaan Kapasiteettikorvaus (€) = Ylläpidetty reservikapasiteetti (MW,h)× D-2-FCR-tuntimarkkinahinta (€/MW,h).

aFRR (automaattinen taajuuden palautusreservi): Korvaukset tulevat tuntimarkkinoilta kapasiteettikorvauksista, jotka muodostuvat kalleimman tarjouksen mukaan joka tunnille.

mFRR (säätösähkö ja säätökapasiteetti): Säätösähkömarkkinoilla korvaukset perustuvat energiamaksuihin, jotka lasketaan ylössäätöhintaan tai alassäätöhintaan perustuen. Säätökapasiteettimarkkinoilta korvaus lasketaan kaavalla Kapasiteettikorvaus (€) = Ylläpidetty reservikapasiteetti (MW,h)× Säätökapasiteettimarkkinoiden hinta (€/MW,h).

FFR (nopea taajuusreservi): Korvaus lasketaan kaavalla Kapasiteettikorvaus (€) = Ylläpidetty reservikapasiteetti (MW,h)* FFR-markkinoiden hinta (€/MW,h) - Sanktiot (€). Sanktiot perustuvat toimittamattoman kapasiteetin määrään.

Tuntimarkkinoilla on käytössä marginaalihinta, joka muodostuu tunnin sisällä ylössäädölle korkeimman ja alassäädölle edullisimman tarjouksen mukaan yhdelle tunnille. Jokaiselle tunnille muodostuu kysynnän ja tarjonnan mukaan eri marginaalihinnat. Kappaleessa avataan kapasiteettikorvauksien logiikkaa ja helpotetaan ymmärtämään mistä liikevaihdon tulot tulevat kun puhutaan Fingridin kapasiteettikorvauksista.

Vuosimarkkinoilla UPHS- ja BESS-tarjonnan aikajaksolle voidaan laskea Fingridin lausekkeen mukaan tuottopotentialit ennen mitään kuluja. Kapasiteetti * Marginaalihinta * pysyvyys = aikajakson tuottopotentiali. Aikajakso on kahdeksan kuukautta joten 240 päivää eli 5 760 tuntia, tuntimäärästä huomioidaan huollot ja muut toimenpiteet, joten arvioidaan sen olevan 5 000 tuntia. Taulukossa 1 pumppuvoiman kapasiteetti on 10 MWh per tuote ja akkuvaraston kapasiteetti on

5 MWh per tuote, marginaalihinnat perustuvat työn aikajakson keskimääräiseen hintaan Fingridin avoimesta datasta ja taulukosta 2.

Taulukko 1. Reservimarkkinoiden arvioidut tulot määrätyillä kapasiteeteilla.

	BESS	UPHS
FCR-N	790 000 €	1 540 000 €
FCR-D ylös	770 000 €	1 580 000 €
AFRR alas	-	1 560 000 €

Liikevaihto tarkasteluissa tarkoituksena on optimoida ajoa DAM-heittely ajojen kanssa, joten tuottopotentiaalit ovat suuntaa antavia. Taulukon 1 tuloksia voidaan pitää arviona, kuinka paljon optimoidun tuoton pitää vähintään olla.

4.1.2 Sähkömarkkinoiden day ahead- ja intraday-markkinoiden myynnit

Varastoille kertyy myynti tuloja, kun niiden kapasiteettia myydään DAM Day Ahead Market- ja ID Intra Day-markkinoilla. UPHS-laitokselle kertyy myynti tuloja ainoastaan, kun sillä tuotetaan sähköä DAM-markkinoilla. ID-markkinoilla voidaan hakea optimointia kapasiteetin myynissä, mutta yleisesti UPHS-laitokselle ID-markkina on tarkoitettu ostoa varten, kun tarvitaan lisää kapasiteettia ylävarastoon.

Sähkön hinnan ollessa halpa varasto ladataan täyteen, jolloin varastoitu latauskustannus on pieni. Sähkön hinnan ollessa kallista tuottoa saadaan siitä, kun varastoa puretaan ja tuotantokustannukset pidetään pieninä. Sähköntuotannon hintaan vaikuttavat tekijät ovat Eydelandin & Wolyniec mukaan.⁸⁸

Hintaan vaikuttavat:

- Kapasiteetti eli maksimi tuotantoteho (MW)
- Hyötysuhteet
- Muuttuvat käyttökustannukset
- Generaattorin minimi- ja maksimituotantotasot
- Odotetut tuotantokatkokset kuten huoltotoimenpiteet

⁸⁸ Eydeland ja Wolyniec - 2003. Sivu 252

- Odottamattomat tuotantokatkokset kuten tekniset viat
- Tuotantotason muutoksen nopeus (MW/min)
- Käynnistys/alasajo kustannukset
- Minimi/maksimi -ajoaika, minimi/maksimi -lepoaika.

4.2 Kustannukset

Varastojen toiminnassa on erilaisia kustannuksia, kun niitä investoidaan, ylläpidetään ja käytetään. Tarkoituksena on tietää näiden eri kustannusten vaikutukset, jotta tarjontamalleista saataisiin mahdollisimman optimoituja.

4.2.1 CAPEX

Capital expenditure eli CAPEX ja suomennettuna pääomamenot. Pääomamenot ovat varoja, joita yritys käyttää fyysisen omaisuuden, kuten kiinteistöjen, laitosten, rakennusten, teknologian tai laitteiden, hankkimiseen, päivittämiseen ja ylläpitoon. CAPEXia käytetään usein yrityksen uusien hankkeiden tai investointien toteuttamiseen. Käyttöomaisuuteen kohdistuvia pääomamenoja voivat UPSH tai BESS olla esimerkiksi muuntajien testaaminen tai vaihtaminen, uuden käyttölaitteen ostaminen tai varaston laajentamista. Yritykset tekevät tämäntyyppisiä taloudellisia menoja lisätäkseen toimintansa laajuutta tai lisätäkseen toiminnalleen jotain tulevaa taloudellista hyötyä.⁸⁹

UPHS-laitosten CAPEX arvioidaan olevan yleisellä tasolla 150–250 miljoonaa euroa, aikaisemmin arvio oli 125 miljoonaa euroa.⁹⁰ Nykyisen rahoitusmarkkinatilanteen ja geopoliittisen tilanteen vuoksi kaikkien kustannusten hinnat ovat nousseet paljon. UPSH-laitokselle tämä tarkoittaa investointi kustannusten nousua ja rakennusvaiheen kustannusten nousua.⁹¹ Kahden eri lähteen mukaan Pyhäsalmen pumppuvoiman investointikustannus oli

⁸⁹ "Capital Expenditure (CAPEX) Definition, Formula, and Examples".

⁹⁰ Mistä joustoa sähköjärjestelmään ÅF raportti.

⁹¹ EPV sisäisen kokouksen muistiinpanot Pyhäsalmen pumppuvoimahankkeesta

vuonna 2012 1000 e/kW eli 75 miljoonaa euroa sekä vuoden 2016 selvityksen mukaan 600 000–2 100 000 e/MW eli 45–157.5 miljoonaa euroa.⁹²

BESS Capex vaihtelee lähteittäin ja useiden lähteiden arviona työssä käytän pääomakustannuksena 251 e/kW, eli 12 MW BESSin pääomakustannus olisi 3.01 miljoonaa euroa. Sykli-ian oltaessa 1200 sykliä ja hyötysuhde 75 %, saadaan varastoidulle energialle hinnaksi 0.279 e/kW.⁹³ Työssä käytetyn BESSin teho ja varastoitava energiamäärä on sama 12 MW ja MWh.

4.2.2 OPEX

Operating expense eli OPEX ja suomennettuna toimintakustannukset. Toimintakustannukset ovat yritykselle aiheutuva kulu sen tavanomaisesta liiketoiminnasta, ne vastaavat toimintakuluja eli muun muassa vuokraa, laitteita, varastokustannuksia, markkinointia, palkanmaksuja, vakuutuksia, tutkimus- ja kehitystyöhön budjetoituja varoja.⁹⁴

Pumppuvoimasta konsulttiyhtiön ÅF:n vuonna 2012 tehdyn tutkimuksen mukaan energiakustannukset 1 500–500 ajotunneilla ovat 40–115 e/MWh tiettyjen parametrien kanssa, jos laitoksella ajetaan 1 500 tuntia vuodessa yksi MWh maksaa laitoksen investoinnin ja rahoituksen takia 40–115 euroa. Tähän pitää vielä huomioida 3.1 % kiinteä kiinteistövero ja häviöiden verotus sähköverotuslain mukaan. Tämä voidaan pyöristää 5 %, lisäksi kaikkien kulujen päälle, eli se tarkoittaisi 40 e/MWh hinnalla 2 e/MWh lisäkuluja ja 115 e/MWh 5.75 e/MWh lisäkuluja.

Investointikustannusten nousun takia pumppuvoiman kokonaiskustannukset, sisältäen tuotannon ja kulutuksen, nousevat vuoden 2012 arviosta. Vuonna 2012 kokonaiskustannukset tuotannolle oli arvioitu olevan 1 500 ajotunnilla 55 e/MWh ja 500 ajotunnilla 145 e/MWh, tämä kaksinkertaistuu investointikustannusten

⁹² Selvitys keinoista sähkötehon riittävyyden varmistamiseksi kulutushuipuissa ÅF raportti.

⁹³ Alexander Haapalainen kandidaattityö LUT

⁹⁴ ” Operating Expense (OPEX) Definition and Examples”.

kaksinkertaistuessa. Vuonna 2023 tuotantokustannuksen arvio olisi 1 500 ajotunnilla 110 e/MWh ja 500 ajotunnilla 290 e/MWh. Verojen jälkeen kustannukset nousevat vielä 5 %, joten voidaan todeta, että UPSH-laitosta on ajettava mahdollisimman paljon tai etsittävä tapa, jolla saadaan optimoitua kapasiteettikorvausten määrä ajojen kanssa.

Akkuvaraston opexin kustannukset, Haapalaisen kandidaattityöstä muokattuna. Tarkastellun aikajakson varastoidun energian kustannukseksi, kerrotaan taajuuden ulkopuolisen ajan, BESS:n kapasiteetin ja akkuun varastoitavan energian hinnan 27.9 snt/kWh. Tulokseksi saadaan varastoidulle energialle 53 568e FCR-N tuotteella.⁹⁵ Taajuusalueen ulkopuolinen aika saadaan Fingridin taajuuden raportista vuodelle 2022.⁹⁶

4.2.3 Muut kulut ja verotus

Sanktiot ovat toimittajalle osoitettuja maksettavia summia, jotka määrätään sähkömarkkinoilla toimittamattoman reservikapasiteetin seurauksena. Niiden suuruus riippuu markkinoista ja hintatasoista.

FCR-markkinoilla sanktio voi perustua joko FCR-tuntimarkkinahintaan tai FCR-vuosimarkkinahintaan ja laskentakaava on Sanktio (€) = Toimittamaton reservikapasiteetti (MWh) × 3 × (korkeampi hinta). D-2-FCR-tuntimarkkinoilla sanktiot perustuvat D-2-FCR-tuntimarkkinahintaan.

mFRR-markkinoilla sanktiot voivat perustua joko säätökapasiteettimarkkinoiden hintaan tai vuorokausimarkkinoiden Suomen tarjousalueen hintaan, ja laskentakaava on Sanktio (€) = Toimittamaton reservikapasiteetti (MWh) × 3 × (korkeampi hinta). aFRR-markkinoilla sanktiot määräytyvät samalla kaavalla, hinta perustuu aFRR-markkinaan.

⁹⁵ Alexander Haapalainen kandityö LUT

⁹⁶ Fingrid frequency report 2022

FFR-markkinoilla sanktiot riippuvat FFR-markkinoiden hintatasosta, ja laskentakaava on $\text{Sanktio (€)} = \text{Toimittamaton reservikapasiteetti (MWh)} \times 3 \times \text{FFR-markkinoiden hinta kyseiseltä tunnilta (€/MWh)}$.

Sähkön hankkiminen on varastoille kulu, joka pyritään ostamaan halvalla ja myymään kalliilla. Molempien varastojen tuotto ja kate perustuvat mahdollisimman halpaan ostettuun sähkөөn. Kiinteistövero on vesivoimalle 3.1%. Pumppuvoimalaitos ja akkuvarastoa ei huomioida sähköverotuksessa energiaekonomistien tekemän esityksen mukaan⁹⁷, mutta häviöistä huomioidaan verot.

4.3 Tarjontamallin teoreettinen viitekehys

Varastojen tarjontamallien teoreettisen viitekehysten näkökulma on saada varastoille optimoitu tuotto, pitkä elinikä sekä kannattava toiminta kantaverkon tukemisessa.

4.3.1 UPSH

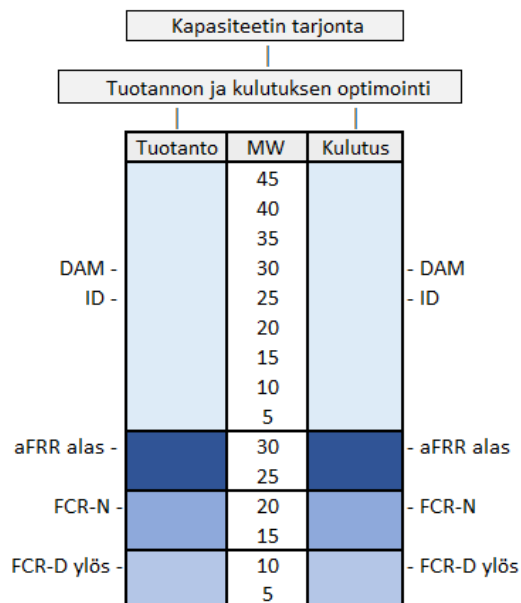
Tarjontamallissa optimoidaan tuotannon ja kulutuksen tarjontaa. Halvoilla hinnoilla ladataan UPSH täyteen ja kalliilla hinnoilla puretaan tyhjäksi. Samaan aikaan kapasiteettia tarjotaan aFRR alassäätö tuotteelle, FCR-N käyttöreserviin ja FCR-D ylösäätö häiriöreserviin. Osallistutaan pelkästään näille tuotteille, koska niiden käyttöhankintamäärä on korvaushinnan kanssa korkein verrattuna muihin tuotteisiin taulukon 2 mukaan.

⁹⁷ "SYKE-OY_Verotus-ja-energian-varastointi_230420.pdf".

Taulukko 2. Fingridin tuotteiden KA-hankintamäärä MW ja hinta e/MW ajanjaksolta 1.1–31.8.2023.

	hankinta / MW	hinta e / MW
FCR-N	47.0	31.6
FCR-D a	44.0	12.7
FCR-D y	60.6	30.8
aFRR a	16.5	27.4
aFRR y	12.6	31.2
mFRR a	25.0	16.9
mFRR y	25.0	13.9

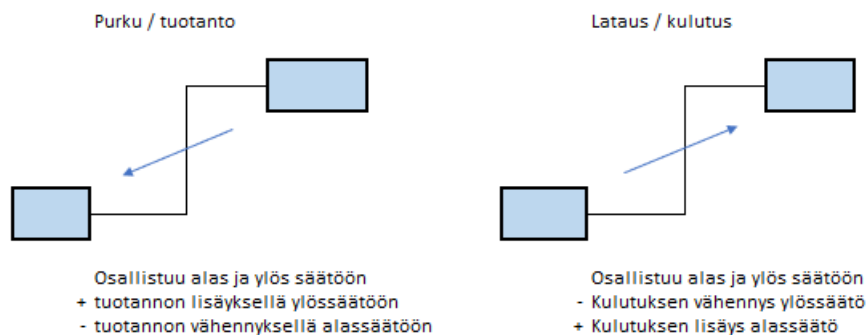
Tarjotaan mieluummin tuotteelle, jolla on ollut suurempi hankintamäärä kuin korvaus. Suuri keskimääräinen hankintamäärä tuotteella vähentää riskiä tarjonnan hylkäämiselle tarjontavaiheessa. Kuvassa 31 on UPHS-kapasiteetin tarjonta eri tuotteille. Kapasiteettia tarjotaan kaikille markkinoille jatkuvasti ja markkinat päättävät, mikä tuote on kannattavin. Tuotannon ja kulutuksen optimoinnissa ajetaan pelkästään joko tuotanto- tai kulutusvaihetta.



Kuvio 31. UPHS-tarjontakapasiteetin jakauma.

Tuotteiden hankintamäärää ja hintaa tarkastellaan päivittäin ja tarkastelun pohjalta tehdään päätöksiä osallistutaanko uusille tuotteille, muuttuneiden hankintamäärien tai nousseiden hintojen takia. Tarkasteluun luodaan algoritmi, jonka avulla voidaan vertailla eri aikajaksoilla tuotteiden kannattavuuksia keskenään. Tuotteiden kannattavuutta ei voida ennustaa tarkasti, joten aktiivinen vertailu ja markkinatietoisuus on tärkeä osa optimointia.

Kalliiden ja halpojen markkinahintojen aikaan on mahdollisuus osallistua mFRR:n säätökapasiteettimarkkinoille latauksen aikana, kun ennusteissa on vähintään 2 päivää negatiivisia tai nolla hintoja. MFRR:n säätökapasiteetti tarjonta toimii latauksen aikana kokonaishintaa alentavana toimena.



Kuvio 32. UPHS-tarjonnan selkeyttämistä Fingridin markkinoille.

Kuvassa 31 ja 32 on selitetty mille tuotteille UPHS voi osallistua ja millä tavoin. Latauksen / kulutuksen aikana UPHS voi osallistua alassäätöihin lisäämällä kulutusta ja ylössäätöihin vähentämällä kulutusta. Purun / tuotannon aikana UPHS voi osallistua alassäätöihin vähentämällä tuotantoa ja ylössäätöihin lisäämällä tuotantoa.

4.3.2 BESS

Varaston teknisten ominaisuuksien vuoksi sitä tarjotaan ainoastaan Fingridin tuotteille. BESS-tarjontaan käytetään taulukkoa 1, jonka avulla valitaan Fingridin tuotteet FCR-N ja FCR-D ylössäätö. Valintaan vaikuttavat tuotteen toteutunut hankintamäärä ja korvaus. Kuvan 33 mukaan kapasiteetti jaetaan kahdelle eri tuotteelle ja varaustason ylläpitoon jätetään 2 MW.

BESS tarjonta	
Jakauma	MW
Varaustaso -	12
	11
FCR-D ylös -	10
	9
	8
	7
	6
FCR-N -	5
	4
	3
	2
	1

Kuvio 33. BESS-tarjontakapasiteetin jakauma huomioiden varaston pitkäikäisyys.

Tuotteiden toteutuneen hankintamäärän ja hinnan avulla tehdään markkina-analyysi ja analyysin perusteella tehdään päätöksiä osallistutaanko toisille tuotteille, muuttuneiden hankintamäärien tai nousseiden hintojen takia.

5 TARJONTAMALLIT JA LIIKEVAIHDON TARKASTELOT

Ennen varastojen tarjontaa markkinoille, kulutuksesta ja tuotannosta pitää tehdä tarjontamalli. Tarjontamallissa huomioidaan varastojen ja markkinoiden rajoitteet ja myös vaikutukset toisiinsa. Tarjontamallien avulla saadaan ohjekirja miten varastoja tarjotaan markkinoille optimaalisesti.

Tarjontamallin hyötyinä on selkeät toimenpiteet reservintoimittajalle, joka tehostaa toimintaa ja luo kannattavuutta toiminnalle. Tarjontamallin tekemisen aikana voi syntyä ideoita uusille liiketoiminta tavoille, koska niissä tutustutaan tarjottavaan varastoon/laitokseen tarkasti ja tarjottaville markkinoille.

Työssä käytetyt mallit perustuvat omaan pohdintaan, jonka takia realistiset mallit voivat olla erilaiset. Työssä esitetään, kuinka varastoille luodaan tarjontamallit, joiden pohjalta saadaan kannattava liikevaihto huomioiden markkinoiden ja varaston tekniset rajoitteet.

Liikevaihto on tavanomaisesta liiketoiminnasta saatua rahaa, joka lasketaan keskimääräisellä myyntihinnalla kertaa myytyjen yksiköiden määrä. Se on ylin luku, josta vähennetään kustannukset nettotuloksen määrittämiseksi.⁹⁸

Työssä tulovirtojen tarkastelussa otetaan huomioon kustannukset ja tulot. Kustannuksissa otettiin huomioon investointi- ja energiankokonaistuotantokustannukset sekä verotus. Tulot koostuvat DAM hintojen heittelyn hyödyntämisestä ja FG reservi tuotteiden korvauksista.

5.1 Pumppuvoimalaitoksen tarjontamalli ja liikevaihto

Varastoa tarjotaan joka päivä sähkö- ja reservimarkkinoille. Asetettujen hintarajojen avulla markkinat luovat ajosuunnitelman varastolle, joka on

⁹⁸ Liikevaihdon määritelmä

kannattavin. Tarjontamallilla tavoitellaan optimoituja tuottoja energiamarkkinoiden hintaerojen avulla.

Varaston yläreservin kapasiteetti on 683 MWh ja 40 MW teholla, latausaika on 17 tuntia. Tarjonnassa varastoa ladataan 40 MW:n teholla ja pyritään pitämään aikajaksot 9 tunnin yhtenäisinä latauksina, jotta kapasiteettia jää reservi tuotteille. Varastoa purkaessa häviöt huomioiden varastosta saadaan 77.16% hyödynnettyä, joka on 527 MWh ja tuotantoaika on 13 tuntia 40 MW teholla. Tuotannon aikana teho on myös 40 MW, jotta reservituotteille jää kapasiteettia. Markkinoille tarjotessa täytyy huomioida nykyinen energiatase, eli ylä- ja alavaraston suhde toisiinsa. Liikevaihdon laskelmissa tämä on otettu huomioon ja tarkastettu ettei energiatase ole liian matala tai korkea, kun aletaan lataamaan tai purkamaan.

Poikkeustapauksessa latausvaiheen aikana hintojen ollessa keskiarvoltaan negatiiviset tarjotaan 10 MWh yhteensä ylös ja alassäätökapasiteettia mFRR-reserviin. Tämän kautta saadaan korvausta, joka lisää tuottoa loppusummaan lataus syklistä. Edellytyksenä on se, että latausvaihetta pidennetään kahdella tunnilla, jotta saadaan uupuvat 90 MWh ladattua varastoon. Ylimääräisen tunnin täytyy olla negatiivinen tai nolla hinnan aikana, joten lisätuoton kate ei pienene.

5.1.1 Kulutusvaiheen optimointi

Kulutus vaiheessa tarjotaan kulutuksen ja tuotannon ennusteiden mukaan yhdeksän peräkkäin olevaa tuntia päivän edullisimmille tunneille. Kuvassa 34 on, kuinka lataus vaiheessa tarjotaan laitosta ja kuvan 34 mukaan latausvaihe maksaa keskiarvolta 4.84 e/MWh. Ennusteista seulotaan edullisimmat tunninit ja asetetaan tarjoukset kyseisille tunneille. Latauksen aikana kapasiteettia voidaan siirtää pitkien nolla tai negatiivisten hintojen aikaan kantaverkkoa tukeville markkinoille, ehtona että ylävarasto on tullut täyteen.

Aika	Hintaennuste	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
00 - 01	37.34									
01 - 02	36.57									
02 - 03	29.15									
03 - 04	19.95									
04 - 05	16.98									
05 - 06	13.69									
06 - 07	19.9									
07 - 08	22.6									
08 - 09	29.87									
09 - 10	17.41	40								
10 - 11	4.69		40							
11 - 12	0.02			40						
12 - 13	0.01				40					
13 - 14	-0.13					40				
14 - 15	-1.03						40			
15 - 16	-0.1							40		
16 - 17	1.77								40	
17 - 18	20.9									40
18 - 19	35.51									
19 - 20	35.79									
20 - 21	33.51									
21 - 22	30.67									
22 - 23	20.75									
23 - 00	16.22									
KA	4.84									
Summa	43.54									

Kuvio 34. Kulutusvaiheen tarjonta-Excel, jossa tarjotaan halvimmille tunneille.

Kulutuksen tarjontamallilla ei aina saada kaikista halvempia tunteja lataukseen. ID-hinnat voivat olla halvempia, joten halpoja ID-hintoja hyödynnetään silloin, kun DAM-tarjouksista ei ole saatu tarpeeksi kulutuskapasiteettia. ID-markkinoita voidaan hyödyntää myös, jos DAM-markkinoilla tapahtuu teknisiä ongelmia. ID-markkinoihin ei voida turvautua ainoana markkinapaikkana, hintojen lyhyellä aikavälillä tapahtuvan vaihtelun takia.

Kulutuksen aikana varastolle day ahead -markkinoilta ostetusta sähköstä voidaan myydä osa ID-markkinoilla, jos myynti hinnan ero ostohintaan on tarpeeksi suuri. Tarkoituksena on saada mahdollisimman yhtenäinen latausjakso, joten ID-myyntin on oltava kannattavampi kuin mahdollinen tuotantojakso. ID-markkinoilla voidaan myös ostaa lisää sähköä, jos ID-hinnat ovat halvemmat kuin DAM-hinnat. ID-markkinoiden tarkoitus on hyödyntää pidentääkseen tai lyhentääkseen latausvaihetta tarpeen mukaan.

Yhteen vetona aikataulus rajoittaa UPHS-latauksen tarjontaa, koska tarjonta on aloitettava jo edellispäivänä, jos halutaan osallistua tuottaville markkinoille.

Latausvaiheessa halutaan mahdollisimman halpa sähkön ostohinta, joten täytyy tarkkailla säähö pohjaisen tuotannon, kulutuksen ja sään ennustuksia. Ennustusten pohjalta hankitaan mahdollisimman halpa sähkö DAM-markkinoilta. Kaikkea lataussähköä ei aina saada suoraan DAM-markkinoilta tai on halvempaa hankkia sähkö ID-markkinoilta. Tätä varten Käytetään algoritmia, joka analysoi markkinoita jatkuvasti vertaillen seuraavien tuntien hintojen suhdetta DAM-hintoihin.

5.1.2 Tuotantovaiheen optimointi

Tuotantovaiheessa halutaan maksimoida tuotantotunnit DAM-markkinoilla ja hyödyntää mahdollisimman kalliit markkinahinnat. Kuvassa 35 nähdään eri tapoja miten tuotantoa voidaan tarjota DAM-markkinoille hintaennusteen mukaan.

Aika	Hintaennuste	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
00 - 01	56												
01 - 02	55.64												
02 - 03	55.21												
03 - 04	55.29												
04 - 05	55.42												
05 - 06	57												
06 - 07	59.82							40					
07 - 08	86.21	40	40	40				40	40				
08 - 09	99.97	40	40	40	40			40	40	40			
09 - 10	88.34	40	40	40	40	40		40	40	40			
10 - 11	75.98	40	40	40	40	40	40	40	40	40			
11 - 12	68.42				40	40	40	40	40	40			
12 - 13	71.59					40	40	40	40	40			
13 - 14	68.42						40	40	40	40			
14 - 15	62.1								40	40			40
15 - 16	61.81		40								40		40
16 - 17	62.94		40	40							40	40	40
17 - 18	77.63	40	40	40	40	40	40				40	40	40
18 - 19	106.47	40		40	40	40	40				40	40	40
19 - 20	94.73	40			40	40	40				40	40	40
20 - 21	60.01										40	40	40
21 - 22	58.14										40	40	
22 - 23	55.27											40	
23 - 00	50.27												40
KA	89.90	78.98	85.36	87.36	83.31	80.46	78.62	79.85	76.40	74.53	73.60	75.10	
YHT	25173	22115	23902	24462	23326	22530	22013	22357	21393	20869	20608	21028	

Kuvio 35. Tuotantovaiheen tarjonta-Excel, tarjontaesimerkki NordPoolin hinnoilla.

Suurin tuotto arvioitu tuotto tulisi tarjouksesta H1. KA tarkoittaa tarjouksen keskihintaa ja YHT on MW*hintaennuste. Samalla ajatuksella tarjotaan latausvaihetta, mutta silloin tavoitellaan mahdollisimman halpoja tunteja. Tässä tarkoituksena on löytää mahdollisimman kalliit tunnit ennusteesta ja tarjota

kapasiteettia näille tunneille. Tuotanto vaiheessa voidaan käydä kauppaa myös ID-markkinoilla, esimerkiksi tilanteessa, jolloin UPHS-laitoksen tuotanto ei ole mennyt DAM-markkinoille kokonaisuudessaan.

Yhteenvedona tuotantovaiheen tarjonta eroaa latausvaiheesta, hinnoittelussa ja sähkön tuotannon vaihtumisesta sähkön kulutukseksi. Tuotantovaiheen aikana toimitaan samojen ohjeiden ja aikataulujen mukaan koskien markkinoita.

5.1.3 Fingridin ajojen optimointi

AFRR-tuotteelle ja FCR-tuotteille kapasiteettia tarjotaan vakio kapasiteeteilla, jokaiselle seuraavan vuorokauden tunneille. AFRR-tarjonta suoritetaan ennen kello 08.30 ja FCR-tuotteiden tarjonta suoritetaan DAM-tulosten jälkeen. Tarjouksia voidaan myös poistaa tunneilta ennen DAM-tuotantoa ja ostaa ID-markkinoilta kapasiteettia, mutta silloin pitää huomioida sanktioiden negatiivinen vaikutus syklin tuottoon.

Kapasiteetit tarjotaan tuntitarjouksilla tuntimarkkinoille, joten on mahdollisuus tarjousten hylkäämiselle tai osittaiselle hyväksynnälle. Näissä tapauksissa ylimääräinen kapasiteetti voidaan myydä ID-markkinoiden kautta, jotta saadaan optimoitua ylimääräinen kapasiteetti.

Latausvaihe perustuu halvan sähkön hyödyntämiseen ja kulutuksen käytön arviointiin, eli milloin käytetään ja tuotetaan eniten sähköä. Silloin on suurin mahdollisuus reservien ja tukemisen tarpeelle. Varaston latauksen aikana tämä tarkoittaisi sähkön vapauttamista takaisin markkinoille eli latauksen sähkötehon pienentämistä.

5.1.4 Liikevaihdon tarkastelu

Liikevaihdon tarkastelun tavoitteena on laskea laitoksen vuoden aikana kertyvä liikevaihto markkinoilta, johon kapasiteettia tarjotaan. Taulukossa 3 ovat tulot kaikilta markkinoilta, ennen kustannuksia. Suurin tuotto saadaan FCR-tuotteilta,

koska aikajakson aikana hankintamäärä oli tavallista korkeampi. DAM-heittelyiden hyödyntäminen voidaan pitää hyvänä tuloksena huomioiden, että ajettiin 38 sykliä. Jokainen sykli tuotti keskimäärin 61 115 euroa. Yhteensä DAM-ajoista tuli 1.33 miljoonaa euroa ja kustannuksia pumppauksesta sekä muista kuluista syntyi 1.36 miljoonaa euroa.

Arvioidut tuottopotentiaalit pitivät melko hyvin paikkansa taulukon 1 mukaan, FCR-N potentiaali oli 1 540 000 miljoonaa ja tulot olivat 1 619 398 miljoonaa euroa reaalityiedoilla. FCR-D-ylössäädön potentiaali oli 1 580 000 miljoonaa euroa ja tulot olivat 1 586 994 miljoonaa euroa reaalityiedoilla. aFRR-alassäädön potentiaali oli 1 560 000 miljoonaa euroa ja tulot olivat 1 074 029 miljoonaa euroa reaalityiedoilla.

Taulukko 3. UPHS-liikevaihto kulujen kanssa.

	TULOT	KUSTANNUKSET
DAM arbitraasi	1 337 719.6 €	- 1 368 000.0 €
aFRR alas	1 074 029.8 €	170 365.21 €
FCR-D ylös	1 586 994.6 €	157 179.36 €
FCR-N	1 619 398.7 €	521 875.16 €
Brutto	5 618 142.7 €	- 518 580.3 €
Netto	5 099 562.4 €	

DAM-ajotunteja oli yhteensä 608 tuntia ja näiden kanssa oli kaksi samanaikaista Fingridin tarjontaa, jolloin hinnat olivat pitkään alhaiset. Kulut huomioitiin laskelmissa mukana energiankustannuksina 30 e/MWh, johon sisältyy myös muut pumppauksessa syntyvät kulut.

aFRR alassäädön tuotteelta tuli korvauksia 1.07 miljoonaa, ylös- ja alassäätöjä ei toteutettu kun laitos oli DAM-ajossa. FCR-käyttöreservistä korvattiin 1.5 miljoonaa euroa. FCR-D-häiriöreservin ylössäädöistä korvattiin 1.6 miljoonaa euroa korvauksia. Yhteensä korvauksia saatiin kaikilta markkinoilta 5.09 miljoonaa

euroa. Ajotunteja kertyi aFRR-alassäädölle 3 990 tuntia, FCR-D-ylössäädölle 5 186 tuntia ja FCR-N-reserville 4 851 tuntia. Ajotunteihin verrattuna DAM-heittelyistä hyötyminen on kaikista tuotteista kannattavinta, mutta huomioiden kustannukset silloin se ei enää ole kannattavaa. Fingridin tuotteilla ajaminen voi tapahtua ajoittain kustannustehokkaasti, eli positiivisesti ja tuottaen lisää tulosta.

Aikajaksossa on 5 832 tuntia eli 243 päivää ja varasto on käytössä yhteensä 5 762 tuntia eli 240 päivää, joten huolloille ja muille vikatilanteille jää aikaa 3 päivää. Laskelmissa ei ole otettu huomioon pidempiä huoltojaksoja tai äkillisiä vikatilanteita, oletetaan että laitos tarkastelujakson ajan kokonaan. Kustannusten noustessa ja epävarmuuksien takia laitosta ei pidetä kannattavana, vaikka liikevaihdon tulos oli positiivinen. Laskelmiin ei ole sisällytetty nykyisiä kustannusarvioita, mutta CAPEX ja OPEX oletetaan olevan kaksin- tai kolminkertaistunut.

5.2 Bess-tarjontamalli ja -liikevaihto

BESS:in tarkoitus on osallistua tukemaan verkontaajuutta ja osallistua häiriö ja käyttöreserviin Fingridin tuotteilla. Varaston nopean reagoitokyvyn ja vasteajan ansiosta se soveltuu todella hyvin verkon tukemiseen. Varastoa ladattaessa kapasiteetti on 12 MWh ja 12 MW:n teholla, lataus- ja purkuaika on 1 tunti. Markkinoille tarjotessa täytyy huomioida nykyinen energiatase, eli varaston varaustaso verrattuna tarjouksen kokoon. Liikevaihdon laskelmissa tämä on otettu huomioon ja tarkastettu ettei energiatase ole liian matala tai korkea kun toteutetaan tarjousta.

5.2.1 Fingridin-tarjonta ja -rajoitteet

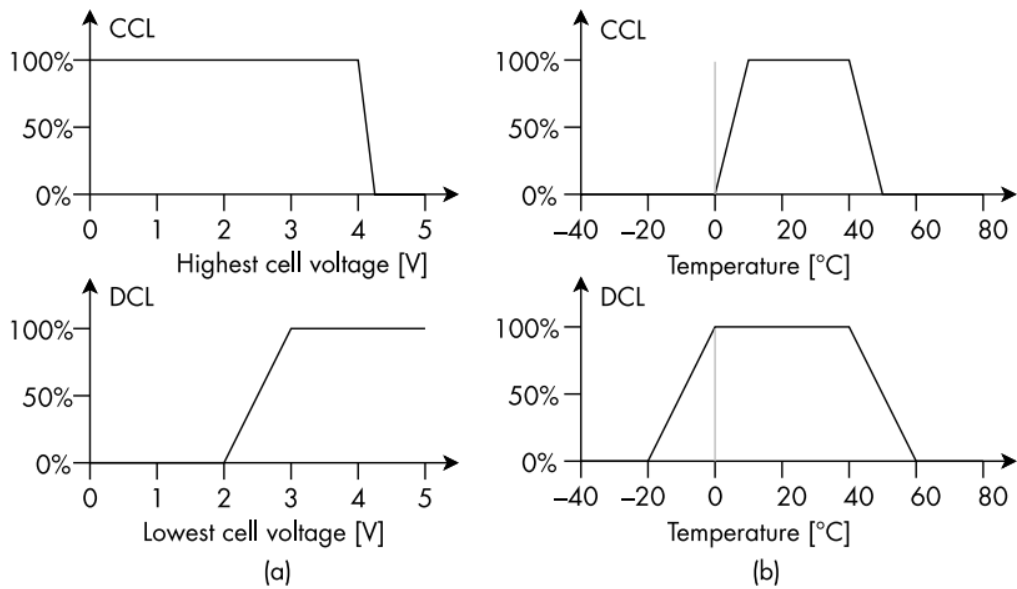
Tarjontamallissa varaston tarkoituksena on toimia ensisijaisesti Fingridin tuotteilla kapasiteetin jaettuna tasaisesti. Fingridin tuotteet FFR ja FCR soveltuvat BESS:n ominaisuuksiin parhaiten, jonka takia nämä ovat tuotteet, joille varaston kapasiteettia harkitaan tarjottavan. Taulukon 1 mukaan parhaimmat korvausten

maksajat ja hankintamääriltään suurimmat ovat FCR-N ja FCR-D ylössäätöreservi, joten kapasiteetti jaetaan näille kahdelle markkinalle tasan jättäen 2 MWh kapasiteettia varaustason ylläpitoon ja akuston pitkäikäisyyden ylläpitämiseen, kuvan 33 mukaan.

Saulnyn diplomityön tutkimuksen lopputuloksena ja oman Fingridin avoimen datan tarkastelun pohjalta BESS:ille kannattavin Fingridin tuote korvaukseltaan on taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N⁹⁹. Avoimen datan avulla tehdään markkina-analyysi viikon lopussa ja tarkastellaan mikä on ollut kaikista kannattavin FG tuote. Kannattavuuden siirtyessä tuotteelta toiselle kapasiteettia siirretään tuotteelta toiselle, jotta BESS:n tuotto olisi mahdollisimman optimoitua. Siirtymisen on oltava nopeaa ja tehokasta, joten FCR- ja FFR-markkinoille tehdään sopimukset heti varaston aloittaessa toiminta ja tehdään vaaditut testit.

BESS:n käyttöä rajoitetaan BMS eli battery management systems asetettujen arvojen mukaan, jotta saadaan pitkä käyttöikä ja optimaalisilla purku- ja latausasetuksilla. Hankkeen ollessa vielä alkuvaiheessa ei ole julkisessa tiedossa varaston käytettävä kemia, jotta työssä voitaisiin määrittellä tarkat rajat. Yleiset BMS asetukset on mahdollista määrittää työssä käytetyille BESS:ille. BMS:n asetuksissa ja rajoissa huomioidaan BESS:n suorituskyky, pitkäikäisyys ja turvallisuus. Otetaan kuvasta 36 asetukset, joita käytetään työn BMS:n asetuksissa.

⁹⁹ Saulnyn maisterityö Fingridin tuotteiden kannattavuudesta. Kappale 7.1



Kuvio 36. Lataus- ja purkurajoitukset lämpötilan tai jännitteen avulla.

Kuvan 36 asetukset voidaan jakaa lämpötilan ja jännitteen avulla. Vaihtoehdon a mukaan BMS:n rajoina pidetään akkukennon jännitteen alhaisinta ja korkeinta arvoa latauksessa (CCL) saa olla korkeintaan 4.2 V ja purun (DCL) saa olla vähintään 2.0 V. Vaihtoehdon b mukaan BMS:n rajoina pidetään lämpötilaa. CCL:n aikana lämpötila saa olla 0 ja 50 asteen välillä ja DCL:n aikana -20 ja 60 asteen välillä. Näillä BMS:n rajoituksilla saadaan edistettyä BESS:n pitkäikäisyyttä, turvallisuutta ja suorituskykyä.¹⁰⁰

Markkina rajoitteina ovat kannattavuus verrattuna muihin markkinoihin, markkinoiden koko ja tekniset vaatimukset. BESS on kannattavampaa tarjota jatkuvasti Fingridin tuotteille, kuin osallistua suhteellisesti pienellä 12 MW:n kapasiteetillä DAM-hintaheittelyihin. Huomioidaan myös, että BESS:iä ei voida tyhjentää minimi- tai maksimivaraustasojen alle tai yli, jottei kemia vahingoitu ja pitkäikäisyys kärsi. ID-markkinoita on tarkoitus käyttää energiataseen vajeen tai ylijäämän korjaamiseen, jos tarve säätökapasiteetille jatkuu pitkään. Säädon tarpeen arviointia on hankala ennustaa liikevaihdon kannalta, sekä taajuuden

¹⁰⁰ BMS säädöt Andrea "lithium-ion batteries practical book" mukaan

ylläpitoreservien käyttäytyminen on erittäin vaihtelevaa. Varaustason on pysyttävä 20–85 % välillä, tämä ylläpidetään ID-kaupankäynnillä tarvittaessa.

BESS:in tarjontamalli perustuu kuvan 33 tarjontajakaumaan, eli kapasiteetti jaetaan käyttöön kaikille Finrgidin tuotteille korvauksen historian mukaan. Tällä hetkellä parhaimmat korvaukset saadaan FCR-N ja FCR-D ylössäädöistä, eli kuvan 6 mukaan tuotannon lisäämistä tai kulutuksen vähentämistä. BESS:illä ylössäätö on varauksen purkamista, eli otetaan energiaa varastosta takaisin käyttöön tai kun varastoa ladataan niin voidaan vähentää tätä tehoa vapauttaen energiaa markkinoille.

5.2.2 Liikevaihdon tarkastelu

BESS:n liikevaihtoa voidaan pitää ajanjaksolta hyvänä, koska FCR-N ja FCR-D ylössäädön hankintamäärät olivat suuria. Tuotteiden korvaukset olivat keskiarvoltaan FCR-N 43.7 e/MWh ja FCR-D ylössäätö 30.8 e/MWh. Tuottopotentialit olivat hieman aliarvioidut, FCR-N potentiaali oli 790 000 euroa ja tulot olivat 1.25 miljoonaa euroa reaalitiedoilla. FCR-D ylössäätö potentiaali oli 770 000 euroa ja tulot olivat 896 515 euroa reaalitiedoilla. Laskelmissa ei ole huomioitu energiataseen ylläpitoa, koska laskelmissa oletetaan että ID-markkinoilta käydään tarvittaessa kauppaa. Tämä oletama luo virhettä laskelmiin.

Taulukko 4. BESS:n liikevaihto kulujen kanssa.

	TULOT	KUSTANNUS
FCR-N	636 250.8 €	198 850.8 €
FCR-D ylös	450 007.4 €	18 721.4 €
YTH	1 086 258.2 €	217 572.2 €
NETTO	868 686.0 €	

FCR-N tuotteelta saatiin korvauksia 630 tuhatta euroa ja FCR-D ylössäätökapasiteetista saatiin korvauksia 450 tuhatta euroa. Yhteensä korvauksia saatiin 1.08 miljoonaa euroa. Tunteja, jolloin FCR-N oli aktiivinen ajanjaksolla, oli

yhteensä 2 916 tuntia ja FCR-D ylössäädöllä 2 916 tuntia. Tunteihin ja korvauksiin verraten FCR-N on molemmista tuotteista kannattavin. Aikajaksossa on 5 832 tuntia eli 243 päivää ja BESSin ollessa käytössä aikajakson aikana yhteensä 121.5 päivää, varastolle jää aikaa jäähtymiselle lataamisen ja purkamisen välillä sekä huoltotoimenpiteille.

OPEX- ja CAPEX-kappaleissa laskettiin varastoidun energian kustannus, joka oli 53 000 euroa. Molemmista tuotteista saadaan yli tämän varastoidun energian kustannukset, joten toimintaa voidaan pitää laskelmien perusteella kannattavana.

6 LIIKEVAIHTOJEN TARKASTELUN ANALYYSI

PHS:n käyttöikä on 40 vuotta, nykyisten tietojen mukaan ennen kuin varasto vaatii modernisointia. BESS:n käyttöikä vaihtelee eri akkujen välillä paljon, mutta lähteen mukaan litiumioniakun käyttöikä on 6–8 vuotta.¹⁰¹

Markkinahintojen lisääntyvien vaihteluiden vaikutus huomataan UPHS- ja BESS-ajossa, sekä nousevassa kysynnässä. Vuoden 2022 talven hintoihin vaikutti eniten Venäjän aloittama hyökkäyssota Ukrainaa vastaan, käyttäen sotavälineenään maakaasun tarjontaa, vaikutukset levisivät myös Eurooppaan ja näkyivät hurjana hintojen nousuna. Vuoden 2022 hintoihin myös vaikutti poikkeuksellisen kuuma kesä, eli jäähdytysenergian takia noussut kulutus ja vesivoiman käytettävyyden vähentyminen haihtumisen takia.^{102 103}

Energian hintaa Suomessa määrittelee monet eri tekijät, kuten Ruotsin ja Norjan vesivarantojen ja energiantuotannon saatavuus sekä Suomen oma tuulivoimantuotanto.¹⁰⁴ Suomen oma tuulivoima tuotanto vaikuttaa jo huomattavasti 5 677 MW:n kapasiteetilla Suomen hintoihin ja Ruotsiin ja Norjaan jää vientiin vielä varaa.¹⁰⁵

Tarjontamalleja kehittäessä molempien varastojen ominaisuudet on otettava huomioon. BESS pienen kapasiteetin vuoksi osallistuu Fingridin tuotteille ja ID-markkinaa käytetään täydennykseen tai kapasiteetin vähentämiseen. UPHS:n suuren tuotanto- ja latauskapasiteetin vuoksi tarjotaan markkinoiden mukaan erilaisella kapasiteettijakaumalla, eli lataus- ja tuotantovaihe tarjotaan kaikille valituille markkinoille ja tarvittaessa käydään kauppaa ID-markkinoilla.

Säätövoima- ja taajuudenvakautusreservien tarve tulee kasvamaan energiamurroksen myötä. Säähajaisen tuotannon lisääntyessä, tarve

¹⁰¹ BESS käyttöikä Choi J, Jo H ja Han s

¹⁰² Energia hintojen nousu Eurooppa-neuvosto

¹⁰³ Fortum ”miksi energianhinta on kallista”

¹⁰⁴ Fortum ”miksi energianhinta on kallista”

¹⁰⁵ Tuulivoima yhdistys tiedote

taajuudenpalautusreserveille nousee. Odotettavissa on se, että manuaalisesta taajuuden palautusreservistä tarve siirtyy automaattiseen taajuuden palautusreserviin. Siirtymän avulla voidaan toteuttaa 15 min tasejakson sisällä olevia säätöjä.¹⁰⁶

UPHS:n liikevaihdon kannattavuus perustuu DAM-hintavaihteluihin, joiden äkillinen vähentyminen tai lisääntyminen vaikuttaa liikevaihtoon ja varaston ajotunteihin. Fingridin markkinoiden kannattavuutta tutkimalla ja muita kirjoituksia lukemalla, päädyin lopputulokseen, että FCR- ja AFRR-tuotteista saa kohtuulista korvausta, kun laitokselle ei ole ajoa DAM-markkinoilla.

Kannattomuuteen vaikuttavat eniten, nousseet kustannukset rahoitus- ja rakennusmarkkinoilla. Kannattomuus lisääntyi, kun kapasiteettia hajautettiin Fingridin tuotteille enemmän sekä liian pienten kapasiteetti määrien ajo Fingridin tuotteilla ei ole kannattavaa UPHS:n suurten tuotantokustannusten takia.

BESS:n liikevaihdon kannattavuus perustuu täysin halpaan lataussähköön ja suureen määrään pieniä ajoja FCR-markkinoilla, joista pitäisi saada suurempi korvaus kuin investointikustannus per kWh. Pienen kapasiteetin takia on kannattavampaa osallistua kaikista parhaiten korvaaville markkinoille ja hankintamäärältään suurimmille.

Kannattomuuteen vaikuttaa akuston kemiallisen käyttäytymisen realisoituminen, kun se tulee käyttöön, jota ei voida vielä arvioida. Näissä laskelmissa akun varaustason ylläpitoon jätettävä 2 MW vaikuttaa kannattomuuteen, mutta kun akustoa halutaan pitää mahdollisimman pitkään mukana markkinoilla ja ylläpitää sen toimintaa niin varaustason ylläpito on edellytyksenä.

¹⁰⁶ "fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf". kpl 5.1.2

7 YHTEENVETO

7.1 Validiteetti ja reliabiliteetti

UPHS:n liikevaihdon ja tarjontamallin validiteetti on heikko, koska ei ole vielä laitosta, josta saataisiin kerättyä dataa ja tehtyä kannattavuuden tutkimuksia. Hankkeilta vetäviltä yrityksiltä ei saa konkreettista tietoa liikesalaisuuksien vuoksi, joten työn taso jäi pintapuoliseksi ja arvioinniksi.

Fingridin aFRR- ja mFRR-tuotteille tarjonta on epävakaata UPHS:n kanssa, koska kaikkia tarjouksia ei aina hyväksytä kokonaan. Sanktioilla on mahdollisuus nousta korkeiksi riippuen tuotteesta, markkinatyypistä ja markkinahinnasta, jolloin tuotto DAM- ja Fingridin markkinoilta vähentyisi merkittävästi.

Lähteiden reliabiliteetti UPHS:n hankkeelle on suhteellisen vahva, sain käyttööni Pyhäsalmen 2017 vuoden kannattavuuslaskelmia, mutta niiden paikkansapitävyys näillä markkinoilla on vanhentunutta. Nykyisestä markkinatilanteesta pitäisi tehdä uusi kattava kannattavuuslaskelma ja tutkia onko laitoksen kannattavuus muuttunut vuodesta 2017 sekä arvio onko laitos kannattava nyt ja 40 vuoden päästä.

BESS:n liikevaihdon ja tarjontamallin validiteetti on hyvä, koska akkuvarastointi on jo suhteellisen tunnettu ja julkisesti tutkittu tekniikka. Tästä löytyi paljon tutkimuksia, joiden pohjalta onnistui tekemään omia pohdintoja ja arvioita laskelmista.

7.2 Jatkotutkimusehdotukset

Kappaleen tarkoitus on esittää työn aikana heränneet jatkotutkimuskysymykset, joihin en työn rajaamisen takia voinut vastata tai etsiä vastauksia.

- UPHS:n kannattavuus suoraan sähköasemaan kytketyillä aurinko ja tuulivoimaloilla, joiden tuotanto käytetään varaston lataamiseen.
- 2023 energia-, rahoitus- ja korkomarkkinoiden vaikutus voimalaitoksen kannattavuuteen.

- Mahdolliset lisätulonlähteet pumppuvoimalatoiminnassa.
- Fingridin tuotteiden jatkuva tarkkailu ja tulevaisuuden arvioinnin työkalu, mitkä tuotteet ovat kannattavimpia.
- Suomen muut mahdolliset pumppuvoimalat ja niiden kannattavuuden tutkiminen.

LÄHTEET

- [1] Nordpool omistajat. Noudettu 3.11.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/>
- [2] Next Kraftwerke Energiamarkkinoiden tuotepuu. Noudettu 5.6.2023 osoitteesta <https://www.next-kraftwerke.com/download-center>
- [3] Sähköpörssin ammattisanasto. Noudettu 5.6.2023 osoitteesta https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkoporssin_ammattisanasto.html
- [4] Mandatum Trader optiot. Noudettu 5.6.2023 osoitteesta <https://www.mandatumtrader.fi/kaupankaynti/instrumentit/optiot/>
- [5] Becoming a customer. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [6] Nordpool history. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [7] Nordpool single hour order. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [8] Nordpool Block order. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [9] Nordpool Exclusive group order. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [10] Nordpool price calculation. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [11] Nordpool price calculation. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [12] Nordpool loss functionality. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [13] Nordpool order types intraday. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/>
- [14] Fingrid reservimarkkinat. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>
- [15] Next Kraftwerke kuva taajuuden tasapainosta. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.next-kraftwerke.com/vpp>
- [16] Tasehallinta Fingrid. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/#tasehallinta>
- [17] Fingrid reservimarkkinat. Noudettu 7.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>
- [18] Fingrid reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- [19] Fingrid lehti "Mitä on inertia?" -Laasonen. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- [20] Fingrid nopea taajuusreservi FFR. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-nopean-taajuusreservin-ffr-toimittajalle.pdf>
- [21] Fingrid taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta

- <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-taajuuden-vakautusreservin-fcr-toimittajalle.pdf>
- [22] Fingrid reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- [23] Fingrid automaattinen taajuuden palautusreservi. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-toimittajalle.pdf>
- [24] Fingrid säätösähkö ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-manuaalisen-taajuuden-palautusreservin-mfrr-toimittajalle.pdf>
- [25] Fingrid sähkömarkkinoiden aikajana. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/#taseselvitys>
- [26] ENTSO-E tuotteiden säätöajat. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/afrr>
- [27] FCR tuotteen tekniset vaatimukset. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-2-taajuuden-vakautusreservien-fcr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakysyttamisprosessi.pdf>
- [28] aFRR tuotteen tekniset vaatimukset. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/uusi-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakysyttamisprosessi.pdf>
- [29] Fingrid säätösähkö ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-manuaalisen-taajuuden-palautusreservin-mfrr-toimittajalle.pdf>
- [30] FFR tuotteen tekniset vaatimukset. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakysyttamisprosessi.pdf>
- [31] FFR tuotteen tekniset vaatimukset. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakysyttamisprosessi.pdf>
- [32] Pohjoismaiden yhtenäiset säätömarkkinat. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismaainen-tasehallinta/eurooppalaiset-reservimarkkinapaikat/>
- [33] Mari jäsenmaat. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta
https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/mari/

- [34] Picasso jäsenmaat. Noudettu 9.6.2023 osoitteesta https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/picasso/
- [35] Jani Piipponen Markkinoille lisää toimijoita. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/saatosahkomarkkinoille-toivotaan-uusua-toimijoita/>
- [36] Fingrid yksitasemalli. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.fingridlehti.fi/yksitasemalli-helpottaa-kulutuksen-ja-tuotannon-yhdistamista/>
- [37] Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja eSett. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.esett.com/app/uploads/2022/12/NBS-Kasikirja-Suomi-4.2.pdf>
- [38] Tasevastuu lain luku 2 lakipykälä 1. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2021/20210767#L2>
- [39] Tasevastuu ja taseselvitysjakso. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tasesahkokauppa-ja-taseselvitys/liite-1-osa-2-fingrid-oyjn-yleiset-taseselvityksen-ehdot.pdf>
- [40] Tasepoikkeama Fingrid. Noudettu 11.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>
- [41] Tasepoikkeaman laskenta Fingrid. Noudettu 11.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>
- [42] eSett lyhyesti. Noudettu 11.6.2023 osoitteesta <https://www.esett.com/about/esett-in-brief/>
- [43] Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja eSett. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.esett.com/app/uploads/2022/12/NBS-Kasikirja-Suomi-4.2.pdf>
- [44] Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja eSett KPL 1.5.1. Noudettu 10.6.2023 osoitteesta <https://www.esett.com/app/uploads/2022/12/NBS-Kasikirja-Suomi-4.2.pdf>
- [45] Fingrid taseselvitys. Noudettu 11.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/>
- [46] Fingrid taseselvitys. Noudettu 11.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/>
- [47] Fingrid taseselvitysmallin kuvaus. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/>
- [48] Renewable energy statics 2022. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf?rev=8e3c22a36f964fa2ad8a50e0b4437870
- [49] Fakta paperi maanalaisista pumppuvoimaloista. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://eeraenergystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=684:EERAFactsheetUnderground-Pumped-Hydro-Energy-Storage-not-final>
- [50] Mine storagen kaupallisen johtajan ja perustajajäsenen Raine Vasanojan kanssa käyty tiedonvaihto ja Mine Storage tietoja. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://www.minestorage.com/>
- [51] Ylen vetyhanke kartta. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20014811>
- [52] Tuulivoimahankkeet tällä hetkellä Suomessa. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-05_2023-1.pdf

- [53] Fingridin tekemiä skenaarioita miten vedyn tuotanto vaikuttaa Suomen sähkönkulutukseen. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/gas-grid-fingrid-vetytaloushankkeen-skenaariot-5-2023.pdf>
- [54] Fingrid sähköjärjestelmävisio 2023. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2023/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf
- [55] Kuva. Noudettu 13.6.2023 osoitteesta <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/enabling-renewable-energy-with-battery-energy-storage-systems#/>
- [56] BESS varastointiaika. Noudettu 13.6.2023 osoitteesta <https://www.globalxetfs.com/short-and-long-duration-energy-storage-essential-to-the-clean-energy-transition/>
- [57] McKinsey Enabling renewable energy with battery energy storage systems. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta <https://mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/enabling-renewable-energy-with-battery-energy-storage-systems>
- [58] BESS käyttökohteita. Noudettu 13.6.2023 osoitteesta <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/enabling-renewable-energy-with-battery-energy-storage-systems#/>
- [59] Huggins 2010 Energy storage. Luettu 13.6.2023 DOI:10.1007/978-1-4419-1024-0
- [60] Coastline EPV Energia Pyhäsalmi hanke. Noudettu 13.6.2023 osoitteesta <https://www.coastline.fi/epv-energy-decarbonises-and-stabilises-finnish-energy-production/>
- [61] Wagner HJ introduction to hydro energy systems. Luettu 13.6.2023 DOI:10.1007/978-3-642-20709-9
- [62] Richard Hammond's Big "How the turbines in the Kölnbrein Dam are 92% efficient" Video. Katsottu 14.6.2023 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=DbvgK3PrSWw>
- [63] Savreen kirjoitus pelton turbiineista. Noudettu 14.6.2023 osoitteesta <https://savree.com/en/encyclopedia/pelton-turbine>
- [64] Savreen kirjoitus pelton turbiinin kauhasta. Noudettu 14.6.2023 osoitteesta <https://savree.com/en/encyclopedia/pelton-turbine>
- [65] Pyhäsalmen pumppuvoima hankkeen projektipäällikkö Aki Hakulisen julkinen esitys hankkeesta. Noudettu 14.6.2023 osoitteesta https://oulunkauppakamari.fi/wp-content/uploads/2022/12/Pyhasalmen-pumppuvoimalaitos-Julkinen_AkiHakulinen.pdf
- [66] Mine Storgen kaupallinen johtaja ja perustajajäsen Raine Vasanojan kanssa käyty keskustelu 12.6.2023
- [67] Pyhäsalmen pumppuvoima hankkeen projektipäällikkö Aki Hakulisen julkinen esitys hankkeesta. Noudettu 14.6.2023 osoitteesta https://oulunkauppakamari.fi/wp-content/uploads/2022/12/Pyhasalmen-pumppuvoimalaitos-Julkinen_AkiHakulinen.pdf
- [68] MTU tutkimukseen tehty havainnollistus kuva. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta <https://www.mtu.edu/news/2022/08/new-research-shows-old-mines-hold-the-power-to-energize-communities.html>

- [69] Pyhäsalmen pumppuvoiman hankkeen projektipäällikön Aki Hakulisen kirjallinen kommentti hankkeesta
- [70] John B. Goodenough Li-ion akkujen yksi keskijöistä. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/goodenough/facts/>
- [71] Invention of the rechargeable battery. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta <https://batteryuniversity.com/article/bu-101-when-was-the-battery-invented>
- [72] IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148
- [73] How lithium batteries work. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta <https://www.energy.gov/energysaver/articles/how-lithium-ion-batteries-work>
- [74] IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148
- [75] Juho Heiska Opetusmateriaali VAMK akku kurssilta
- [76] IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030 Sivut 63-61. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148
- [77] Juho Heiska Opetusmateriaali VAMK akku kurssilta
- [78] Our world in data battery price decline. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>
- [79] IRENA Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. Noudettu 15.6.2023 osoitteesta https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148
- [80] UCI doctoral candidate Mya Le Thai has developed a nanowire-based technology that allows lithium-ion batteries to be recharged hundreds of thousands of times. Noudettu 25.10.2023 osoitteesta <https://news.uci.edu/2016/04/20/all-powered-up/>
- [81] EPV Akkuhybridin toimitusjohtajan Niko Topparin kommentti akkuvarastoinnin hintakehityksestä
- [82] Neoen rakentaa Suomeen Pohjoismaiden suurimman akkuvaraston. Noudettu 18.6.2023 osoitteesta <https://neoen.com/fi/uutiset/2020/neoen-rakentaa-suomeen-pohjoismaiden-suurimman-akkuvaraston/>
- [83] Neoenin akkuvarasto toimittaa. Noudettu 18.6.2023 osoitteesta <https://neoen.com/fi/uutiset/2022/19620/>
- [84] Investointien viivästyttämiset. Noudettu 18.6.2023 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52003DC0326&from=ET>
- [85] Fingrid kantaverkkomaksut. Noudettu 18.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/oikaisu-fingridin-25.5.2023-tiedotteeseen-vuonna-2022-kantaverkkomaksut-jatettiin-perimatta-joulukuulta-ei-neljalta-kuukaudelta/>

- [86] BESS economics. Noudettu 19.6.2023 osoitteesta <https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>
- [87] "Energy Sector Management Assistance Program - 2020 - Deploying Storage for Power Systems in Developing .pdf". sivu 12. Luettu 20.8.2023 <https://doi.org/10.1596/34400>
- [88] Fingrid reservituotteen ehdot toimittajalle, kappale ylivoimainen este. Noudettu 8.6.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-taajuuden-vakautusreservin-fcr-toimittajalle.pdf>
- [89] "Eydeland ja Wolyniec - 2003 - Energy and power risk management new developments.pdf". sivu 252. Noudettu 21.6.2023 osoitteesta <http://radoudoux.free.fr/Wiley%20Finance,.Energy%20and%20Power%20Risk%20Management%20-%20New%20Developments%20in%20Modeling,%20Pricing%20and%20Hedging.%20%5B2003.ISBN0471104000%5D.pdf>
- [90] CAPEX definition. Noudettu 23.6.2023 osoitteesta <https://www.investopedia.com/terms/c/capitalexpenditure.asp>
- [91] EPV sisäisen kokouksen muistiinpanot Pyhäsalmen pumppuvoimahankkeesta
- [92] Mistä joustoa sähköjärjestelmään ÅF raportti. Noudettu 24.6.2023 osoitteesta https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf
- [93] Selvitys keinoista sähkötehon riittävyyden varmistamiseksi kulutushuipuiissa ÅF raportti. Noudettu 24.6.2023 osoitteesta <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/files/68e07a99abc9af2aa4843060eb036c6383c3cf50/917.pdf>
- [94] OPEX definition. Noudettu 23.10.2023 osoitteesta https://www.investopedia.com/terms/o/operating_expense.asp
- [95] Alexander Haapalainen kandityö LUT. Luettu 23.10.2023 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163779/kandidaatinty%C3%B6_haapalainen_aleksandr.pdf?sequence=3
- [96] Fingrid frequency report 2022. Noudettu 15.8.2023 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/frequency_quality_analysis_2022_public.pdf
- [97] SYKE energian verotus ja varastointi. Luettu 15.8.2023 osoitteesta https://energiaekonomistit.fi/wp/wp-content/uploads/2020/04/SYKE-OY_Verotus-ja-energian-varastointi_230420.pdf
- [98] Liikevaihdon määritelmä. Noudettu 16.8.2023 osoitteesta <https://www.investopedia.com/terms/r/revenue.asp>
- [99] Saulnyn maisterityö Fingridin tuotteiden kannattavuudesta. Kappale 7.1. Noudettu 17.8.2023 osoitteesta <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/27106>
- [100] BMS säädöt "Andrea - Lithium-Ion Batteries and Applications A Practica book". sivu 247-248
- [101] BESS käyttöikä Choi J, Jo H, Han S. BESS life span evaluation in terms of battery wear through operation examples of BESS for frequency regulation.

- Teoksessa: 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). 2017. s. 1–5. Noudettu 20.8.2023 [DOI:10.1109/ISGT-Asia.2017.8378432](https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2017.8378432)
- [102] Energia hintojen nousu Eurooppa-neuvosto. Noudettu 21.8.2023 osoitteesta <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/energy-prices-2021/>
- [103] Fortum “miksi energia on kallista”. Noudettu 21.8.2023 osoitteesta <https://yhdedssa.fortum.fi/miksi-s%C3%A4hk%C3%B6n-hinta-on-nyt-korkealla>
- [104] Fortum”miksi energia on kallista”. Noudettu 21.8.2023 osoitteesta <https://yhdedssa.fortum.fi/miksi-s%C3%A4hk%C3%B6n-hinta-on-nyt-korkealla>
- [105] Tuulivoimayhdistys tiedote. Noudettu 21.8.2023 osoitteesta <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-75-ja-toi-suomeen-yli-29-miljardin-investoinnit>
- [106] Fingrid sähköjärjestelmävisio 2023 kpl 5.1.2. Noudettu 12.6.2023 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2023/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf