

Olli Vaheri

SÄHKÖAUTOJEN LATAUSOPERAAT- TORIN MAHDOLLISUUDET SÄHKÖN RESERVIMARKKINOILLA

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Pertti Järventausta
Joni Markkula
Lokakuu 2023

TIIVISTELMÄ

Olli Vaheri: Sähköautojen latausoperaattorin mahdollisuudet sähkön reservimarkkinoilla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2023

Sähköautot ovat yleistyneet viime vuosina merkittävästi ja samalla niiden lataamiseen käytettävät tehot ovat kasvaneet vuosi vuodelta. Samaan aikaan vihreän siirtymän myötä sähkömarkkinat ovat olleet suuren muutoksen kohteena, sillä säästä riippuvaiset ja vaikeasti ennustettavat uusiutuvat sähkön tuotantomuodot muodostavat merkittävän osan Suomen sähkön tuotannosta. Tämä tuo haasteita sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseen eli sähköjärjestelmän tasehallintaan. Tehotasapainon hallinnasta vastaa Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid reservimarkkinoiden avulla. Diplomityön aiheena oli tutkia, voidaanko kasvavat mutta rajoitetusti säädetävissä olevat sähköajoneuvojen lataustehot viedä reservimarkkinoille ja sähköjärjestelmän taajuuden ylläpitoon.

Työn teoriaosuus muodostui kirjallisuuskatsauksesta, jossa tutustuttiin sähköajoneuvoihin, niiden latausratkaisuihin ja Suomen sähkömarkkinoihin. Diplomityön tutkimusosuus tehtiin konstruktivisena tutkimuksena. Konstruktivinen tutkimus soveltuu hyvin tutkimuksiin, joissa on tavoitteena luoda ja ottaa käyttöön esimerkiksi uusi toimintamalli tai muu abstrakti kokonaisuus. Tutkimuksessa selvitettiin mille reservimarkkinoille latausratkaisuilla olisi mahdollista osallistua, mistä kapasiteettia olisi mahdollista kerätä ja millaisia tuottoja reservimarkkinoilta olisi mahdollista saada.

Tutkimuksen tuloksena selvisi, että ensisijaisesti soveltuvin reservilaji latausratkaisuille olisi taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) ja toissijaisesti automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). Muissa reservilajeissa ongelmaksi muodostuu aktivoinnin nopeusvaatimus (FFR), vaatimus symmetrisestä ylös- ja alassäädöstä (FCR-N) tai että itsenäinen aggregointi ei ole sallittua (mFRR). FCR-D reserviä suosii keskimäärin lyhyet kapasiteetin säätöajat ja että kapasiteettia tarvitsee aktivoida usein vain pieni määrä tarjotusta kokonaiskapasiteetista, jolloin ladattavien ajoneuvojen häiriintyminen on pienehköä.

Sopivien reservilajien minimi tarjouskoon ollessa 1 MW joudutaan sen täyttämiseksi aggregoimaan useita latauspaikkoja suuremmaksi kokonaisuudeksi. Itsenäisen aggregaattorin tulee ilmoittaa reservikohteen tasevastaavan vaihtumisesta Fingridille 14 vuorokautta ennen tasevastaavan vaihtumista, mikä muodostuu ongelmaksi, jos aggregoitavien latauspaikkojen lukumäärä kasvaa suureksi. Käytännössä reservimarkkinoille voidaan aggregoida ainoastaan suuria DC-latauslaitetekonaisuuksia, jolloin aggregoitavien latauspaikkojen lukumäärä pysyy matalana ja mitaus- ja tiedonsiirtojärjestelmien rakentamisesta ei muodostu suurta kustannusta.

Ensisijaisesti reservimarkkinoille kannattaa osallistua Plugitin omalla avautuvalla julkisella raskaan liikenteen latausasemaverkostolla, jos mahdollisimman monen latausaseman yhteyteen asennetaan energiavarasto varmistamaan kapasiteetin riittävyys. Energiavarastojen avulla asiakkaan lataus ei häiriinny reservikäytön takia ja saatavilla on reservisäätökapasiteettia vuorokauden jokaiselle tunnille. Kun reservimarkkinoille osallistuminen on tuttua ja ohjausjärjestelmä on rakennettu reservimarkkinoille soveltuvaksi, voidaan reservimarkkinoille osallistumista ruveta tarjoamaan palveluna suurille latausvarikoille.

Reservimarkkinoiden nykyisten korvausten suuruudella pystytään rahoittamaan koko energiavarastosta aiheutuva lisäinvestointi julkisen latausverkoston tapauksessa. Reserveistä saatavien korvausten ei oleteta laskevan merkittävästi tulevaisuudessa. Reservimarkkinoille osallistumisesta on alussa suurehko työllistävä vaikutus, jotta järjestelmä saadaan rakennettua reservimarkkinoille sopivaksi, mutta sen jälkeen reservikapasiteettia voidaan lisätä suhteellisen yksinkertaisesti. Alkuinvestoinnin jälkeen reservimarkkinoilla toimisesta muodostuvat kulut jäävät vähäiseksi.

Avainsanat: Sähköauto, sähköajoneuvojen lataus, ladattavat ajoneuvot, sähkön reservimarkkinat, kysyntäjousto, kuormanhallinta, FCR, aFRR, Fingrid.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Olli Vaheri: Opportunities for electric vehicles charging operators in the electricity reserve markets.

Master's Thesis

Tampere University

Master's Programme in Electrical Engineering

September 2023

In recent years, electric vehicles have become significantly more common, and the power used for charging them has increased year by year. At the same time, due to the green transition, the electricity markets have undergone significant changes, as weather-dependent and unpredictable renewable electricity production forms a significant part of Finland's electricity generation. This poses challenges for balancing electricity demand and supply, i.e., the management of the electricity system's balance. In Finland, the responsibility for balance management is held by the transmission system operator Fingrid with reserve markets. The topic of this thesis was to investigate whether the growing but limited adjustable charging powers of electric vehicles could be used in reserve markets and for maintaining the stability of the electricity system.

The theoretical part of the work consisted of a literature review, which explored electric vehicles, their charging solutions, and the electricity markets in Finland. The research part of the thesis was conducted as constructive research. Constructive research is well-suited for studies with the goal of creating and implementing new operational models or other abstract concepts. The study aimed to determine which reserve markets charging solutions could potentially participate in, where capacity could be collected, and what kind of profits could be obtained from reserve markets.

The results of the study showed that the most suitable reserve type for charging solutions would primarily be Frequency Containment Reserve for Disturbances (FCR-D) and secondarily Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR). Other reserve types presented challenges due to requirements for activation speed (FFR), symmetrical up and down regulation (FCR-N), or the impossibility of independent aggregation (mFRR). FCR-D reserve is generally favored due to short adjustment times on average, and usually only a small portion of the offered total capacity needs to be used, resulting in minimal disruption to charging vehicles.

To meet the minimum bid size requirements for suitable reserve types (1 MW), multiple charging locations must be aggregated into a larger entity. The reserve provider must notify Fingrid of the change in the electricity balance responsible party for the reserve 14 days before the change, which becomes problematic if the number of aggregated charging locations becomes large. In practice, only large DC charging station complexes can be aggregated for reserve markets, keeping the number of aggregated charging locations low, and minimizing the cost of building measurement and communication systems.

It is primarily profitable to participate in reserve markets with Plugit's own open public heavy-duty charging station network if it will be equipped with energy storage systems. Energy storage ensures that customer charging is not disrupted due to reserve use, and reserve adjustment capacity is available for every hour of the day. Once participation in reserve markets is familiar, and the control system is adapted to reserve market requirements, participation in reserve markets can be offered as a service to large charging depots.

The current compensation levels in reserve markets can cover the additional investment caused by the energy storage system in the case of a public charging network. It is not expected that the compensation from reserves will significantly decrease in the future. Participation in reserve markets initially has a significant impact on workload to build the system suitable for reserve markets, but afterward, reserve capacity can be relatively easily increased. After the initial investment, the costs associated with operating in reserve markets are quite low.

Keywords: Electric vehicle, electric vehicle charging, plug-in vehicles, electricity reserve markets, demand response, load management, FCR, aFRR, Fingrid

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Diplomityön valmistumiseen konkretisoituu ja päättyy omalta osaltani matkani jatko-opiskelujen ihmeellisessä maailmassa. Työelämästä paluu muutamaksi vuodeksi lähes täysipäiväiseksi opiskelijaksi on ollut erittäin nautinnollinen ja mahdollistanut kokemuksia, jotka eivät olisi olleet mahdollisia ilman. Uskon myös, että jatko-opiskelut tässä vaiheessa työuraani on ollut oikea päätös ja ne ovat tehneet minusta entistä monipuolisemman ja valmiimman työkaverin tuleviin haasteisiin.

Diplomityön laatiminen on ollut mielenkiintoinen ja opettavainen matka, jossa osaamiseni sähköajoneuvojen latausratkaisuista ja sähkömarkkinoiden toiminnasta kasvoivat merkittävästi. Haluan käyttää tämän tilaisuuden kiittäkseni kaikkia niitä, jotka ovat olleet mukana tukemassa ja innostamassa minua tämän tutkimuksen parissa. Suuret kiitokset Plugit Finland Oy:lle työn mahdollistamisesta ja erityisesti kiitokset koko Plugitin osavalle tuotekehitystiimille, sekä työn valvoja Juha Kukkuraiselle.

Toivon, että tämä diplomityö tarjoaa hyödyllistä tietoa ja näkökulmia aiheesta kiinnostuneille ja antaa Plugitille mahdollisuudet jatkaa prosessia reservimarkkinoille osallistumiseksi.

Näillä sanoilla toivotankin juuri sinut rakas lukija sisään pitkälle matkalle kohti sanojen lumoa ja tieteen taikaa sähköajoneuvojen sekä sähkömarkkinoiden ympäriltä. Suosittelem ottamaan oikein mukavan asennon, kupin tai kaksi lämmintä kofeiinipitoista juotavaa ja tyhjentämään kalenterin loppupäiväksi, jotta pääset sukeltamaan kanssani täydellä keskittymisellä akateemisen tuotokseni pariin!

Pirkkalassa, 3.10.2023

Olli Vaheri

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta	1
1.2 Plugit Finland Oy.....	2
1.3 Työn tavoite, rakenne ja tutkimusmenetelmät	2
2.SÄHKÖAJONEUVOT JA NIIDEN LATAUSTEKNIIKAT	4
2.1 Liikenteen sähköistyminen	4
2.1.1 Ilmastotavoitteet.....	4
2.2 Ladattavat ajoneuvot.....	7
2.2.1 Perinteiset hybridit	8
2.2.2 Ladattavat hybridit.....	9
2.2.3 Täyssähköautot	10
2.2.4 Ladattavien autojen akustot	11
2.3 Lataustekniikat.....	14
2.3.1 Lataustapa 1, Mode 1	15
2.3.2 Lataustapa 2, Mode 2	16
2.3.3 Lataustapa 3, Mode 3	17
2.3.4 Lataustapa 4, Mode 4	19
2.4 Vehicle-To-X	21
2.5 Kuormanhallinta ja älykäs lataus.....	25
2.6 Kommunikointi ja taustajärjestelmät	26
3.SÄHKÖMARKKINAT.....	29
3.1 Suomen sähkömarkkinat.....	29
3.1.1 Sähköpörssi.....	31
3.2 Tasehallinta ja sen haasteet.....	31
3.3 Sähkön johdannaismarkkinat	33
3.4 Vuorokausimarkkinat.....	34
3.5 Päivänsisäiset markkinat.....	36
3.6 Säätosähkö- ja reservimarkkinat	37
3.6.1 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat	38
3.6.2 Reservimarkkinat	38
3.7 Taseselvitys	40
3.8 Kysyntäjousto.....	41
3.9 Reservimarkkinoille osallistuminen.....	42
3.9.1 Vaatimukset.....	43
3.9.2 Korvaukset.....	49

3.9.3	Aggregointi.....	51
4.	LATAUSKUORMAN KYSYNTÄJOUSTON KANNATTAVUUS JA VAATIMUKSET	
	RESERVIMARKKINOILLE OSALLISTUMISEEN.....	55
4.1	Markkinapaikan valinta.....	55
4.2	Saatavilla olevat tuotot.....	57
4.2.1	Automaattinen taajuuden palautusreservi.....	57
4.2.2	Taajuusohjattu häiriöreservi.....	58
4.3	Osallistumisen vaatimukset.....	60
4.3.1	Säätökoe.....	61
4.3.2	Mittausvaatimukset.....	65
4.3.3	Tiedonvaihtovaatimukset.....	66
5.	MAHDOLLISUUDET RESERVIKAPASITEETIN KERÄÄMISEKSI.....	68
5.1	Taloyhtiöt.....	68
5.2	Työpaikat ja yritykset.....	69
5.3	Julkinen lataus.....	69
5.4	Ammattiliikenne.....	70
5.5	Ansaintamallit Plugitille ja asiakkaalle.....	71
5.6	CASE: Suuri ammattiliikenteen asiakas.....	72
5.6.1	Nykyinen latauskäyttäytyminen.....	72
5.6.2	Joustokapasiteetin määrän arviointi.....	73
5.6.3	Saatavilla olevat korvaukset.....	74
5.6.4	Vaatimukset osallistumiselle.....	76
5.7	CASE: Raskaan liikenteen julkinen latausverkosto.....	77
5.7.1	Latausasemien käyttö ja ominaisuudet.....	77
5.7.2	Saatavilla olevat korvaukset.....	79
5.7.3	Vaatimukset osallistumiselle.....	81
6.	RESERVIMARKKINOIDEN MAHDOLLISUUDET TULEVAISUUDESSA.....	83
6.1	Latausverkon laajentuessa.....	83
6.2	Tasevastuiden ylläpidon automatisoituminen.....	83
6.3	Kaksisuuntainen lataus.....	84
6.4	Muutokset reservimäärissä tai hinnassa.....	85
7.	YHTEENVETO.....	87
7.1	Työn tulokset.....	87
7.2	Pohdinta.....	89
	LÄHTEET.....	91
	LIITE A: RESERVILAJIEN REAALIAIKASIGNAALIT.....	98
	LIITE B: RESERVILAJIEN HISTORIAMÄÄRÄTIEDOT.....	99

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Manner-Suomessa liikennekäytössä olevat ladattavat ajoneuvot vuosittain. [12].....</i>	4
Kuva 2.	<i>Ensirekisteröinnit käyttövoimittain Manner-Suomessa. [19].....</i>	7
Kuva 3.	<i>Eri käyttövoimien osuudet ensirekisteröidyistä ajoneuvoista Manner-Suomessa. [23].....</i>	8
Kuva 4.	<i>Perinteisen hybridauton rakenne. [25].....</i>	9
Kuva 5.	<i>Ladattavan rinnakkaishybridin rakenne. [25].....</i>	9
Kuva 6.	<i>Vasemmalla ylhäällä ajoneuvo saapumassa virroitinlataukseen (pantografi) ja oikealla perinteinen kaapelilataus. [35].....</i>	15
Kuva 7.	<i>Nordig Plug -lataustavan 2 mukainen kannettava latauslaite voimavirtaan. [39].....</i>	17
Kuva 8.	<i>Tyyppin 2 pistorasia ja ”Mennekes”-pistoke. [41].....</i>	18
Kuva 9.	<i>Lataustapojen 2 ja 3 tehon ja kommunikaation havainnekuva. Muokattu eri lähteistä.</i>	19
Kuva 10.	<i>Tehon ja kommunikaation havainnekuva lataustavasta 4. Muokattu eri lähteistä.</i>	20
Kuva 11.	<i>CCS2 (Combo 2) konfiguraation mukainen pikalatausliitin. [41]</i>	21
Kuva 12.	<i>Eri puolilla maailmaa käytettävät latausliittimet. [43].....</i>	21
Kuva 13.	<i>Havainnekuva kaksisuuntaisesta DC-latauksesta. [46]</i>	24
Kuva 14.	<i>Havainnekuva latausjärjestelmän kommunikoinneista.....</i>	28
Kuva 15.	<i>Sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti 2022. [54].....</i>	30
Kuva 16.	<i>Sähkön eri markkinapaikat aikajärjestyksessä vasemmalta oikealle. [56].....</i>	31
Kuva 17.	<i>Tasehallinnan primääri- ja sekundäärisäädön havainnekuva. [53]</i>	32
Kuva 18.	<i>Havainnekuva pienen inertian tilanteesta. [58].....</i>	33
Kuva 19.	<i>Sähkön markkinahinnan muodostuminen ja tuotantomuotojen käyttöönottojärjestys. [60]</i>	35
Kuva 20.	<i>Sähkön kysyntä- ja tarjontakäyrät Suomessa 14.4.2023 klo 14. [62].....</i>	36
Kuva 21.	<i>Sähkön reservituotteet Suomessa. [64].....</i>	37
Kuva 22.	<i>Automaattisten taajuusohjattujen reservien aktivoituminen. [64]</i>	40
Kuva 23.	<i>Kysyntäjoustoperiatekuva. [69].....</i>	42
Kuva 24.	<i>Kysyntäjoustoperiatekuva eri markkinapaikoille Suomessa. Tilanne 1.2.2022. [64]</i>	42
Kuva 25.	<i>Yksinkertaistettu prosessi reservimarkkinoille liittymisestä. Muokattu lähteestä. [66].....</i>	43
Kuva 26.	<i>Säätömarkkinoiden siirtoaluerajat kartalla. [63].....</i>	48
Kuva 27.	<i>Esimerkkikorvauksia 1 MW reservin ylläpitämisestä. [64].....</i>	49
Kuva 28.	<i>Aggregoinnin toimintaperiaate yksinkertaistettuna.</i>	52
Kuva 29.	<i>Aggregoidun reservikohteen testaus kokonaisuutena. Mukailtuna lähteestä [73]</i>	53
Kuva 30.	<i>Yksittäisten resurssien testaus. Mukailtuna lähteestä [73].....</i>	54
Kuva 31.	<i>Reservimarkkinoihin osallistuvat tuotantomuodot. [79].....</i>	56
Kuva 32.	<i>FCR-D reservistä maksettavan korvauksen suuruus pysyvyyssäyrällä. Muokattu lähteestä. [67]</i>	60

Kuva 33.	<i>Teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi. [76].....</i>	<i>61</i>
Kuva 34.	<i>Säätökokeen testisekvenssi aFRR-markkinassa. [76].....</i>	<i>62</i>
Kuva 35.	<i>Minimi aktivointinopeus aFRR-reservissä. [76].....</i>	<i>63</i>
Kuva 36.	<i>Taajuusohjatun häiriöreservin ylössäädön todentamisen testisekvenssi. [73].....</i>	<i>64</i>
Kuva 37.	<i>FCR-D lineaarinen säätökäyrä. [73].....</i>	<i>64</i>
Kuva 38.	<i>Sallittu paloittain lineaarinen FCR-D säätöalue. [73]</i>	<i>65</i>
Kuva 39.	<i>Suuren kansallisen latausoperaattorin viikoittainen latausteho. [80].....</i>	<i>70</i>
Kuva 40.	<i>Ammattiliikenteen toimijan latausvarikoiden tuntikohtaiset lataustehot. [80]</i>	<i>73</i>
Kuva 41.	<i>Fingridin hankintaennuste reservikapasiteetin enimmäismäärästä tulevaisuudessa. [74]</i>	<i>86</i>

LYHENTEET JA KÄSITTEET

CaaS	Plugit CaaS (Charging as a Service) –palvelumalli, jossa Plugit tarjoaa latausratkaisuja palveluna. Asiakas maksaa palvelusta kuukausisopimuksen mukaisesti, mutta mitään suurta investointia laitteisiin ei tarvita.
Reserviresurssi	Yksittäinen säätökykyinen resurssi kuten voimalaitos, kulutuskohde tai energiavarasto.
Reservikohde	Kokonaisuus, joka täyttää reservin tarjoamista koskevat vaatimukset. Reservikohde voi koostua useammasta reserviresurssista.
Tasesähkö	Tasepalvelun tarjoajan tarjoamaa sähköenergiaa, jota siirtoverkonhaltijat käyttävät verkon tasapainottamiseen.
aFRR	Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) on keskitetysti ohjattu automaattisesti aktivoituva taajuuden palautusreservi.
mFRR	Manuaalinen taajuuden palautusreservi (mFRR) on manuaalisesti aktivoituva taajuuden palautusreservi.
FCR	Frequency Containment Reserve eli taajuuden vakautusreservillä tarkoitetaan reserviä, joka on käytettävissä taajuuden vakauttamiseen sähkön tuotannon ja kulutuksen epätasapainotilanteissa.
FEN	FEN eli Finnish Elcom Network on Fingridin ja energiayhtiöiden välinen yksityinen verkko, minkä avulla eri toimijoiden valvomot pystyvät kommunikoimaan luotettavasti.
kW	Kilowatti, tehon yksikkö.
kWh	Kilowattitunti, energian yksikkö.
KoVa-FEN	On päivitetty versio FEN-verkosta, joka toteuttaa Korkean Varautumisen periaatteita ja mahdollistaa tietoliikenne- ja puheyhteydet vähintään 24 tunnin ajaksi, vaikka kantaverkko olisi ajettu alas suurihäiriön takia.
V2X	Vehicle-To-Everything, jolla tarkoitetaan ajoneuvon yhteyttä muihin ympäristöön. Tämän diplomityön osalta sillä tarkoitetaan lähinnä energian siirtämistä ajoneuvosta asuinkiinteistöön (Vehicle-To-Home) tai ajoneuvosta sähköverkkoon (Vehicle-To-Grid).
Marginaalihinta	Marginaalihinnalla tai marginaalihinnoittelulla tarkoitetaan tilannetta, jossa kaikki hyväksytyt tarjoukset tehneet toimijat saavat saman korvauksen kalleimman hyväksytyt tarjoukset mukaisesti.

JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Energiamarkkinoilla eletään murroksen keskellä. Merkittävä osa nykyisestä eurooppalaisesta energian tuotantokapasiteetista on poistumassa ikääntymisen tai ilmastotavoitteiden mukaisten poliittisten päätösten takia ja samanaikaisesti digitalisoitumisen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen tähtäävien toimenpiteiden seurauksena sähkön kulutus tulee kasvamaan merkittävästi. Pohjoismaissa suurimpina ajureina sähkön kulutuksen kasvulle nähdään datakeskuskapasiteetin kasvaminen ja talojen lämmityksen, liikenteen ja teollisuuden prosessien sähköistyminen. Myös suunnitelmat vihreän vedyn tuotantolaitosten sijoittamisesta Suomeen lisäisi sähkön kulutusta merkittävästi. Vähäpäästöinen sähköntuotanto tulee kasvamaan tulevina vuosikymmeninä, josta suurin osa on säästä riippuvaista tuulivoimaa. Säästä riippuvainen ja vaikeasti ennustettava sähköntuotanto aiheuttaa omat haasteensa sähköjärjestelmän tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa. Kaikki tuotanto ei ole helposti säädettävissä vaihtelevan kulutuksen mukaan, joten tätä varten joudutaan käyttämään erilaisia reservijärjestelmiä pitämään taajuus halutuissa rajoissa. Taajuuden suuret poikkeamat voivat pahimmillaan rikkoa herkkiä sähkötekniisiä laitteita ja taajuuden liian suuri poikkeama voi vaarantaa jopa koko kansallisen sähköjärjestelmän toiminnan. Tämä näkyy jo tällä hetkellä huomattavasti kasvaneina sähköjärjestelmän reservien tarpeina, sekä sähkön hinnan kovana heiluntana. Tuulisena päivänä sähkön hinta tippuu hyvinkin matalalle, kun taas tyyneellä kelillä hinta voi olla moninkertainen. Sekä reservimarkkinoihin että sähkön hinnan heiluntaan vaikuttaa myös Venäjän kaupankäynnin keskeyttäminen Venäjän aloittaman sodan myötä. [1][2]

Sähköautot ovat yleistyneet räjähdysmäisesti viime vuosien aikana ja samanaikaisesti puheet sähkökriisistä ovat olleet läsnä valtamediassa asti. Sähköautojen lisääntyminen on herättänyt huolta sähkön jakeluverkon kestävydestä ja sähkön tuotannon riittävydestä. Lisääntyvä määrä sähköautoja tarvitsee aina lisääntyvän määrän latauskapasiteettia ja liikenteen sähköistyminen onkin yksi merkittävimmistä kehitystrendeistä muuttuvassa energiainfrastruktuurissa. Sähköautot ovat osaltaan lisäämässä sähkön kulutusta, mutta voivat olla myös merkittävä osa älykästä sähköjärjestelmää. Sähköautojen lataamiseen käytettävät tehot rupeavat olemaan kansallisella tasolla suurehkoja ja niitä säätämällä tai ajoittamalla voi olla suuriakin seurauksia sähköverkon tilan kannalta kriittisillä hetkillä. Sähköautot ovat käytännössä pyörien päällä olevia energiavarastoja, joten

niiden avulla voidaan optimoida energian käyttöä hyvinkin joustavasti. Sähköautot osana älykästä sähköverkkoa voi luoda monenlaisia mahdollisuuksia sähkömarkkinoilla toimimiseen. [3] Tällä hetkellä sähköautojen latausoperaattorit eivät ole olleet osallisina sähkön reservimarkkinoilla, ainakaan suoraan ilman erillistä aggregaattoria. Liikennevirta Oy yhdessä Eatonin kanssa tarjoaa energiavarastojen omistajalle mahdollisuuden osallistua virtuaalivoimalalla reservimarkkinoille Virta-alustan kautta. [4][5]

1.2 Plugit Finland Oy

Työ tilaajana toimii Plugit Finland Oy (myöhemmin Plugit). Plugit on Suomen johtava sähköisen liikenteen palveluntarjoaja, jonka missiona on luoda ja tuoda latausratkaisut sinne, missä ihmiset viettävät aikaa ja tarvitsevat latausta: koteihin, työpaikoille, kauppoihin ja liikekeskuksiin. Plugit on perustettu 2012 ja alan pioneerina se on ollut tuomassa latausratkaisuja Suomeen. Plugit tunnetaan latausteknologian edelläkävijänä, erityisen asiakaslähtöisistä palveluratkaisuista ja koko arvoketjun kattavista avaimet käteen -ratkaisuista, jotka sisältävät ratkaisusuunnittelun, latauslaitteet, asennukset ja ylläpitopalvelun. Plugitilla on oma Cloud-palvelu, omaa laitevalmistusta DC-latausratkaisuihin ja se tarjoaa latausratkaisuja myös palveluna (Charging-as-a-Service). Plugitin asiakaskunta jakautuu neljään eri segmenttiin, jotka ovat: Taloyhtiöt, Työpaikat ja yritykset, Julkiset, sekä Ammattiliikenne. Yhteensä Plugitin ylläpitämän Plugit Cloud-järjestelmän perässä on yli kymmenen tuhatta latauspistoketta ja määrä kasvaa jatkuvasti. Toiminta on pääasiassa keskittynyt Suomen markkinoille, mutta Plugitin ratkaisuja löytyy kasvavissa määrin myös Ruotsista ja esimerkiksi Kaakkois-Aasiasta. [7][8]

1.3 Työn tavoite, rakenne ja tutkimusmenetelmät

Työn tavoitteena on tutkia ja selvittää latausoperaattorin mahdollisuuksia osallistua Fingridin ylläpitämille sähkön reservimarkkinoille. Tulosten pohjalta voidaan miettiä liiketoimintamalleja, joissa huomioidaan reservimarkkinat.

Työ on jaettu seitsämään lukuun, joissa tämä johdanto on ensimmäinen. Toisessa luvussa käydään läpi Suomen tilannetta sähköautojen ja niiden latausratkaisujen osalta. Luvussa perehdytään myös kuormanhallintaan, sekä latausratkaisujen taustajärjestelmiin. Kolmannessa luvussa käydään läpi sähkömarkkinoiden nykytilaa keskittyen sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpitämiseen. Luvussa esitellään sähkön säätö- ja reservimarkkinat, niiden tekniset vaatimukset ja saatavissa olevia korvauksia yleisellä tasolla. Luvut 2 ja 3 muodostavat yhdessä työn teoriaosuuden, joka toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Teoriaosuuden jälkeen luvussa neljä tutkitaan kuinka kysyntäjoustop avulla olisi mahdollista osallistua reservimarkkinoille, minkälaisia tuottoja sieltä olisi saatavilla ja mitä vaatimuksia reservimarkkinoille osallistumisesta muodostuu. Viidennessä kappaleessa tutkitaan mistä latausoperaattorin latausasiakassegmenteistä olisi mahdollista kerätä reservimarkkinoille soveltuvaa säätökapasiteettia asiakassegmenttikohtaisesti. Lisäksi kappaleessa käydään läpi kaksi CASE-tapausta, joissa tutustutaan hiukan tarkemmin kahteen hiukan erilaiseen kohteeseen, joissa reservimarkkinoille osallistuminen voisi olla mahdollista. Apuna tutkimuksissa käytetään toimeksiantajan vuosien varrella keräämää lataustietojen dataa. Kuudennessa luvussa pohditaan hiukan latausoperaattorien mahdollisuuksia tulevaisuudessa, kun latausverkosto ja autokanta laajenee tai Vehicle-To-Grid ratkaisut yleistyvät. Viimeisessä luvussa kootaan johtopäätökset yhteen ja pohditaan työssä saavutettuja tuloksia peilaten niitä tutkimuskysymyksiin. Pohdinnassa käydään myös läpi työtä kokonaisuutena.

Keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

- Onko latausoperaattorilla mahdollisuuksia osallistua sähkön reservimarkkinoille?
- Mille reservituotteiden markkinapaikoille latausoperaattorilla riittää tekniset edellytykset osallistua?
- Onko latausoperaattorin reservimarkkinoille osallistuminen taloudellisesti järkevää liiketoimintaa?
- Kuinka reservimarkkinoille osallistuminen käytännössä tapahtuu?

Diplomityö tehdään konstruktiiivisena tutkimuksena. Konstruktiiivisella tutkimusotteella tarkoitetaan tutkimusta, jonka tarkoituksena on tuottaa innovatiivisia konstruktioita, jolla pyritään ratkaisemaan reaali maailman ongelmia. Konstruktiiivinen tutkimus soveltuu hyvin tutkimuksiin, joissa on tavoitteena luoda ja ottaa käyttöön esimerkiksi uusi toimintamalli tai muu abstrakti kokonaisuus. Edellytykselliset ydinpiirteet konstruktiiiviselle tutkimukselle ovat:

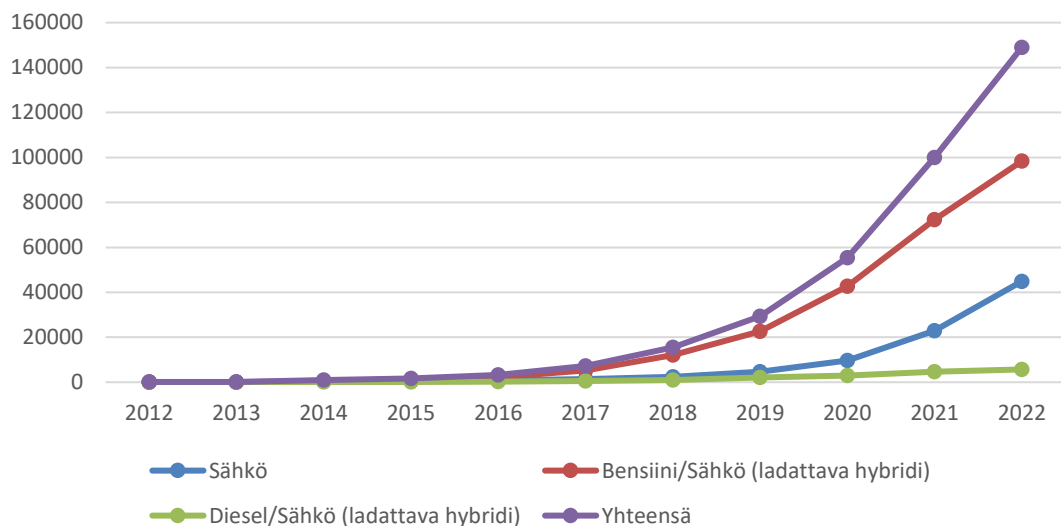
- se keskittyy tosielämän ongelmiin, joihin on tarpeellista keksiä ratkaisu
- kytkeytyy olemassa olevaan teoreettiseen tietämykseen
- tuottaa innovatiivisen ratkaisun alkuperäiseen ongelmaan [9][10]

Työ rajataan käsittelemään ainoastaan Fingridin ylläpitämiä reservimarkkinoita Suomessa. Lisäksi tutkimuksen lähtökohtana on, että reservimarkkinoille osallistutaan ainoastaan lataustehon säätelyllä eli kysyntäjoustopilla, mutta työssä sivutaan myös energia-varastoja ja Vehicle-To-Grid ratkaisuja.

2. SÄHKÖAJONEUVOT JA NIIDEN LATAUSTEKNIIKAT

2.1 Liikenteen sähköistyminen

Suomen autokanta on lähtenyt sähköistymään eksponentiaalisesti 2010-luvulta alkaen ja suosion arvioidaan jatkuvan samanlaisena erilaisten automallien määrän lisääntyessä, hintojen painuessa alaspäin ja latausinfrastruktuurin parantuessa. Ladattavien ajoneuvojen määrä on esitetty kuvassa 1. Ladattavien autojen valikoima on monipuolistunut kysynnän kasvun myötä ja nykyään ladattavia ajoneuvoja on tarjolla lähes jokaisella merkittäväällä autonvalmistajalla erilaisissa kokoluokissa. Suurin mallivalikoima tällä hetkellä on keskikokoisten ja näitä suurempien autojen luokissa. [11]



Kuva 1. Manner-Suomessa liikennekäytössä olevat ladattavat ajoneuvot vuosittain. [12]

2.1.1 Ilmastotavoitteet

Suurimpia ajureita liikenteen sähköistymiseen on ilmastotavoitteet, sillä noin viidennes Suomen kasvihuonekaasupäästöistä ja noin 40 prosenttia ns. taakanjakosektorin päästöistä on peräisin liikenteestä vuonna 2019. "Taakanjakosektorilla tarkoitetaan päästökauppasektorin ulkopuolisia sektoreita. Taakanjakosektoriin kuuluvat liikenne, maatalous, rakennusten erillislämmitys, jätehuolto, työkonet ja fluoratut kasvihuonekaasut sekä päästökaupan ulkopuoliset pienet teollisuus- ja lämpölaitokset. Taakanjakosektorin päästövähennyksiä ohjataan sekä kansallisella että EU-tason sääntelyllä [13]". Tieliikenteen-

teestä syntyy noin 94 % kotimaan liikenteen päästöistä ja loppu 6 % jakautuu vesiliikenteelle, sekä dieselkäyttöisille rautatievetureille. Enemmistö tieliikenteen päästöistä aiheutuu henkilöautoista (54 %), sekä paketti- ja kuorma-autoista (41 %) ja pieni vähemmistö linja-autoista ja moottoripyöristä ynnä muista liikenteen moottoriajoneuvoista (5 %). Kotimaan lentoliikenteen päästöt käsitellään omana päästölähteenään. Sähkökäyttöisellä ajoneuvolla ajaessa ei synny laisinkaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä, sillä sähköautojen lataukseen käytettävä sähköntuotannon energia kuuluu päästökaupan piiriin ja käsitellään erillään. [14]

Liikenteen päästöjen pienentämisen tarve liittyy Pariisin ilmastopöytäkirjaan, jossa maapallon keskilämpötilan nousu rajataan 1,5 asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. Tämän tavoitteen toteutumiseksi vaaditaan nopeita ja radikaaleja leikkauksia päästöihin kaikilla yhteiskunnan sektoreilla. Tavoite edellyttää globaalien hiilidioksidipäästöjen puolittamista vuoteen 2030 mennessä ja nettonollapäästöihin tulisi päästä vuoden 2050 aikoihin. EU-lainsäädännön mukaan Suomen tulee vähentää taakanjakosektorilla kasvihuonekaasupäästöjään 39 prosentilla vuoteen 2030 mennessä, kun vertailulukuna on vuoden 2005 päästöt [14]. Eurooppalaisen ilmastolain mukaan kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä 55 % vuoteen 2030 mennessä, kun vertailutasona on vuoden 1990 taso. Ilmastolakiin on kirjattu myös tavoite olla ensimmäinen ilmastoneutraali maanosana vuoteen 2050 mennessä. [15] Suomen uusi ilmastolaki astui voimaan 1.7.2022 ja sen keskeinen tavoite on varmistaa, että Suomi saavuttaa hiilineutraaliuden viimeistään vuonna 2035. Muita merkkipaaluja ovat taakanjako- ja päästökauppasektorin yhteenlaskettujen päästöjen pieneminen 60 % vuoteen 2030 mennessä, 80 % vuoteen 2040 mennessä ja yli 90 % vuoteen 2050 mennessä, kun vertailutasona on vuoden 1990 taso [16]. Suomen tavoitteet ovat siis varsinkin hiilineutraaliuden suhteen edellä EU:n tavoitteita, hiilineutraaliustavoitteen ollessa Suomella vuonna 2035 ja EU:lla vuonna 2050.

Vaihtoehtoja liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseksi ovat liikenteen sähköistyminen, liikenteen tehostaminen, muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö ja esim. etätyön lisääminen ja sitä kautta liikenteen vähentäminen. Kasvihuonekaasupäästöjen tavoitteiden mukaiseen puolittamiseen vuoteen 2030 mennessä vaaditaan fossiilisten polttoaineiden kulutuksen lähes puolittaminen. Fossiilisten polttoaineiden kulutuksen pienentämiseksi voidaan vähentää ajettujen kilometrien määrää tai pienentää liikenneajoneuvojen kuluttamaan polttoainemäärää. Vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarkoitetaan polttoaineita ja voimanlähteitä, jolla pystytään korvaamaan fossiilisia polttoaineita liikenteessä. Vaihtoehtoisia polttoaineita ovat mm. sähkö, vety, ammoniakki, biopolttoaineet,

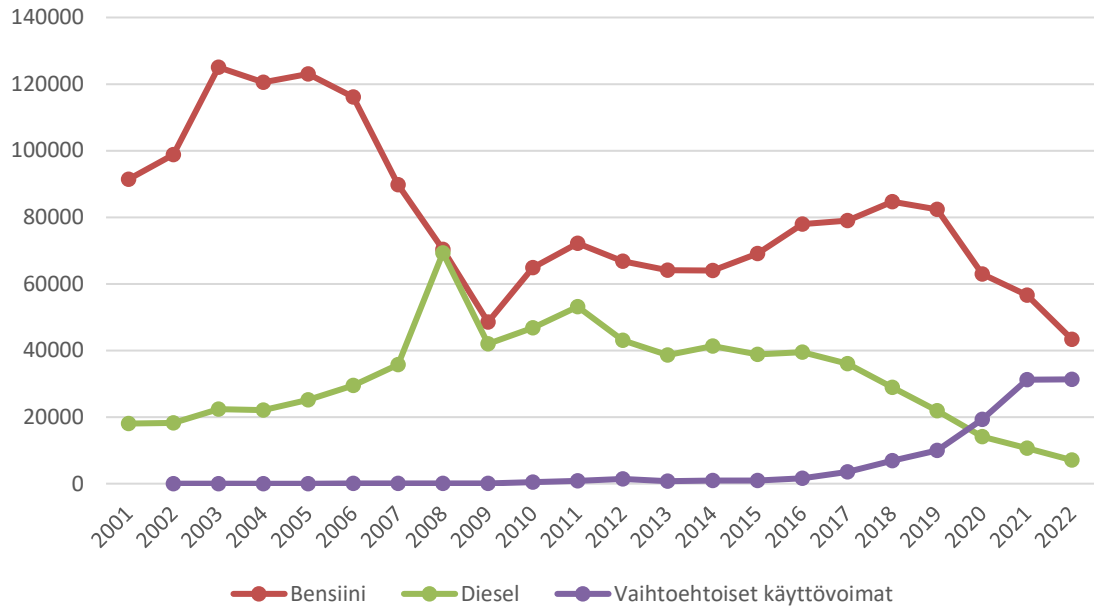
maakaasuun perustuvat vähähiiliset polttoaineet ja synteettiset polttoaineet. Näistä sähkö, vety, ammoniakki ja biopolttoaineet katsotaan liikenteessä päästöttömiksi, sillä ne eivät lisää hiilen kiertoa ilmakehässä. Synteettisten ja ns. sähköpolttoaineiden osalta päästöjen laskentasäännöt ovat vielä auki. [14][17]

Päästöttömien ja vähäpäästöisten ajoneuvojen yleistymiseksi on niiden lataus- ja tankkausinfrastruktuurin kehityttävä samassa tahdissa. Nestemäisten bio- ja sähköpolttoaineiden jakelu onnistuu helposti nykyistä tankkausinfrastruktuuria käyttäen, sillä niitä voidaan kasvavassa määrässä sekoittaa nykyisiin fossiilisiin polttoaineisiin, mutta vety-, kaasu- ja sähköautot tarvitsevat lisää infrastruktuuria yleistyäkseen merkittävästi. EU-tasolla vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin lisääntymistä käsitellään direktiivissä 2014/94/EU, jossa tärkeimmiksi vaihtoehtoisiksi polttoaineiksi on määritelty sähkö, vety, biopolttoaineet, maakaasu ja nestekaasu. [18] Direktiivin tarkoituksena on tukea alkuvaiheessa vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria, jotta niitä hyödyntävät ajoneuvot yleistyvät ja infrastruktuuri alkaa rakentumaan sen jälkeen markkinaehtoisesti.

Suomen tavoitteena on, että vuonna 2030 sataa täyssähköautoa kohden löytyy yksi julkinen latausasema ja jokaisella täyssähköautolla olisi latauspiste yön yli tapahtuvaan lataukseen. Paineistetun kaasun (CNG) tankkausasemia tulisi olla Suomessa yhteensä 100 kappaletta ja nesteytetyn kaasun tankkausasemia 40 kappaletta vuoteen 2025 mennessä. [14]

EU-parlamentti hyväksyi kantansa esitykseen, jossa määritellään kansalliset minimitalvoitteet latausinfrastruktuurille EU:n pääteillä. Vuoteen 2026 mennessä pääteillä tulee olla vähintään yksi henkilöauton sähkölatauspiste 60 kilometrin välein. Ehdotuksessa on myös mukana vetytankkauspisteiden lisääminen niin, että EU:n pääteillä tulisi olla tankkauspiste vähintään 100 kilometrin välein vuoteen 2028 mennessä. [17]

Vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat yleistyneet viime vuosina merkittävästi ja trendin jatkuessa ne ovat vuoden 2023 jälkeen yleisin käyttövoima autojen ensirekisteröinneissä. Perinteisten bensiini- ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen osuudet ovat olleet selkeässä laskussa, kun vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat vallanneet markkinaa. Vaihtoehtoisilla käyttövoimilla tarkoitetaan tässä yhteydessä kaikkia muita polttoaineita kuin bensiini ja diesel, sekä näiden ei-ladattavia hybridimalleja. Eri polttoaineilla käyvien ajoneuvojen ensirekisteröinnit Manner-Suomessa näkyy kuvassa 2.



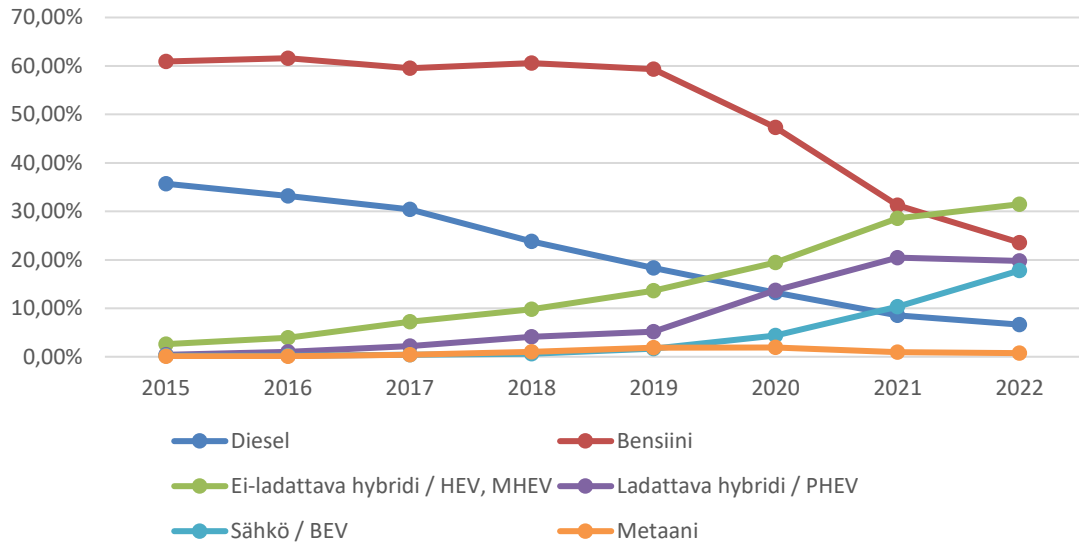
Kuva 2. Ensirekisteröinnit käyttövoimittain Manner-Suomessa. [19]

Perinteisten fossiilisia polttoaineita käyttävien uusien ajoneuvojen ja kevyiden hyötyajoneuvojen myynti loppuu EU:n alueella vuoteen 2035 mennessä. Uusien ajoneuvojen päästöjen vähenemistä voidaan tehdä perinteisin menetelmin vuoteen 2035 asti, mutta sen jälkeen ei myydä enää autoja, joiden käyttö aiheuttaa tieliikenteen kasvuhuonepäästöjä. EU-komissio myös esittää, että vuoteen 2025 mennessä säädetään menetelmä, jonka avulla seurataan henkilö- ja pakettiautojen koko elinkaaren aikaisia päästöjä. [14][21]

2.2 Ladattavat ajoneuvot

Sähköautoista puhuttaessa käytetään useasti erilaisia termejä, kuten sähköauto tai ladattava auto. Sähköautoista puhuttaessa usein tarkoitetaan ainoastaan täyssähköautoja, mutta joskus myös lataushybrideitä, joka voi aiheuttaa sekaannusta. Sekaannuksien välttämiseksi ainoastaan sähköllä kulkevista ajoneuvoista olisi suositeltavaa puhua täyssähköautoina ja jos näiden lisäksi viitataan ladattaviin hybrideihin, niin on suositeltavaa puhua ladattavista autoista.

Ladattavien ajoneuvojen osuus uusista Manner-Suomessa rekisteröidyissä autoissa on ollut suuressa kasvussa, mikä näkyy kuvassa 3. [22] Seuraavaksi tässä kappaleessa käydään läpi erilaisten sähkökäyttöisten ajoneuvojen tekniikkaa.

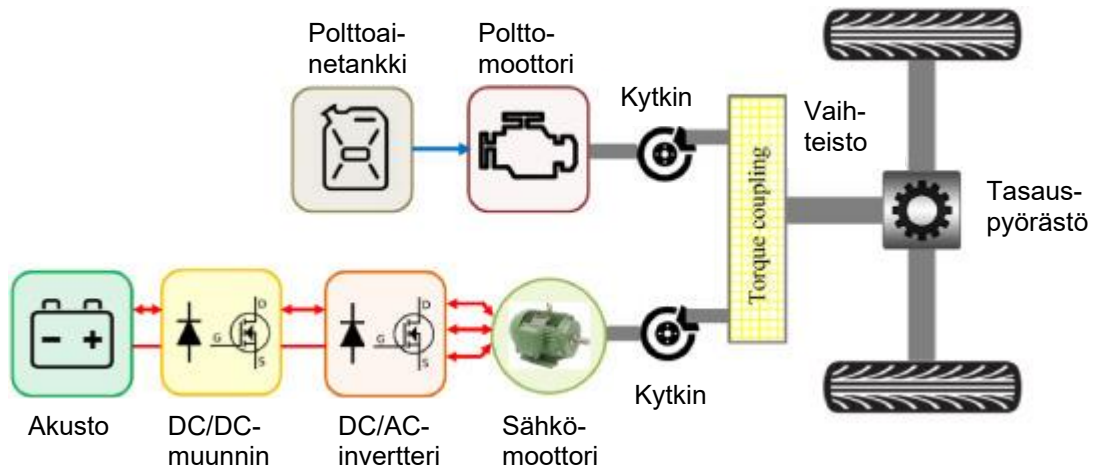


Kuva 3. Eri käyttövoimien osuudet ensirekisteröidyistä ajoneuvoista Manner-Suomessa. [23]

2.2.1 Perinteiset hybridit

Nykyaikaisten sähköisten ajoneuvojen aikakausi alkoi vuosituhannen vaiheessa, kun Toyota toi ensimmäisenä markkinoilla hybridiauton vuonna 1997. Se oli ensimmäinen massatuotettu hybridiajoneuvo ja oli sähköisten ajoneuvojen kannalta mullistava tuote. Hybridit ovat yleistyneet tämän jälkeen kovalla tahdilla ja vuonna 2022 Manner-Suomessa lähes joka kolmas auto (31,47 %) olikin ei ladattava hybridi. Vuonna 2015 vastaava luku oli vain 2,6 % [23]

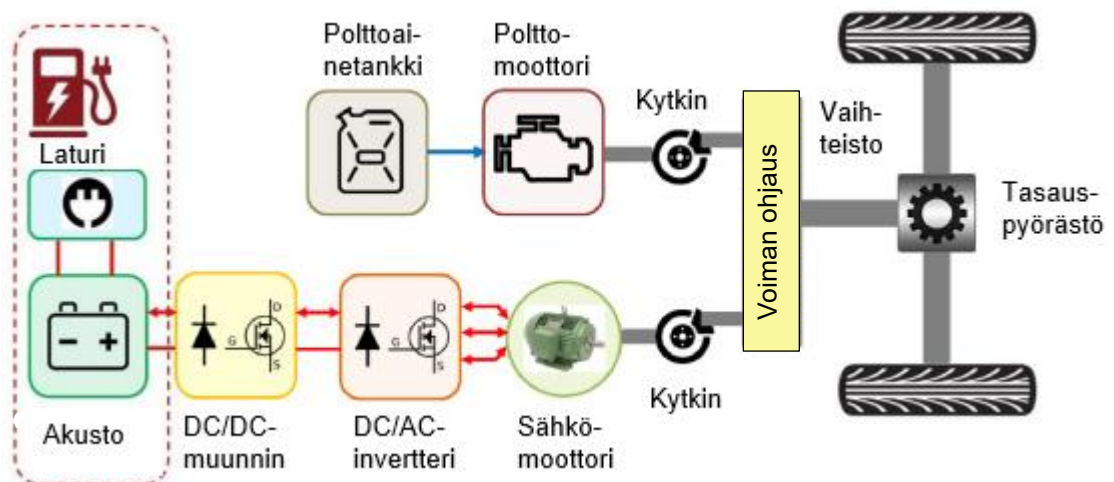
Hybridiautolla tarkoitetaan ajoneuvoa, joka hyödyntää kahta eri energianlähdettä. Useimmiten tarkoitetaan polttomoottorin ja sähköjärjestelmän yhdistelmää, mutta hybridiauto voi hyödyntää myös esimerkiksi bensiiniä ja kaasua. Tässä työssä hybridiautolla tarkoitetaan perinteistä polttomoottoria ja sähköä yhdistäviä ajoneuvoja. Hybridiautossa on normaalin polttomoottorin lisäksi pieni sähkömoottori ja ajoakku, josta sähkömoottori saa energiansa. Sähkömoottori toimii moottorin lisäksi generaattorina ja sen avulla energiaa ladataan ajoakkuun esimerkiksi jarrutuksien yhteydessä tai muuten ajon aikana polttomoottorin kuormitusta lisäämällä. Tässä työssä ei käsitellä perinteisiä hybridiautoja lainkaan, sillä niitä ei pystytä lataamaan sähköverkosta, vaan toiminta perustuu pelkästään polttomoottorin tuottaman energian hyödyntämiseen. Normaalit hybridit laskeaan aikaisemmin esitetyssä kuvassa 2 mukaan bensiini- ja dieselautoihin. Hybridiauton rakenne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Perinteisen hybridi-auton rakenne. [25]

2.2.2 Ladattavat hybridit

Samalla tavalla kuin perinteisissä hybrideissä, ladattavassa hybridissä on usein perinteisen polttomoottorin lisäksi sähköinen voimalinja. Ero perinteiseen hybridiin tulee siitä, että sähköjärjestelmä pystytään lataamaan auton ulkopuolelta sähköverkosta. Ladattavan hybridin sähköjärjestelmä on usein myös selkeästi kookkaampi ja siten kyvykkäämpi kuin perinteisen hybridin. Manner-Suomessa noin joka viides (19,79 %) ensirekisteröity auto vuonna 2022 oli ladattava hybridi, kun vastaava luku oli vuonna 2015 vain 0,4 %. Ladattavat hybridit ovat siis yleistyneet lähes räjähdysmäisesti. Laskiessa ei-ladattavat hybridit ja ladattavat hybridit yhteen, oli niiden osuus ensirekisteröidyistä autoista yli puolet (~51 %). [22][23][24][25][26] Ladattavan hybridin rakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Ladattavan rinnakkaishybridin rakenne. [25]

2.2.3 Täyssähköautot

Manner-Suomessa liikennekäytössä olevia täyssähköautoja oli vuoden 2022 loppuun mennessä 44 889 kpl. Samaan aikaan koko autokanta oli 2 740 393 kpl, joten sähköautot muodostavat ~1,6 % koko Manner-Suomen autokannasta [12]. Määrä on kuitenkin kovassa kasvussa, sillä vuonna 2022 ensirekisteröidyistä autoista melkein 18 % oli täyssähköautoja. [23] Täyssähköautolla tarkoitetaan ajoneuvoa, jonka käyttövoima on 100 % sähkö. Täyssähköt eivät ole mikään uusi keksintö, vaan niitä on ollut pienissä määrin olemassa lähes koko autojen historian ajan ja niiden historia on jopa vanhempi kuin polttomootoriauton. Ensimmäiset autot olivat höyrykäyttöisiä, mutta 1800-luvun loppupuolella kehitettiin ensimmäiset akkukäyttöiset sähköautot. Polttomootoriautot kehittyivät 1900-luvun alussa kuitenkin nopeasti ja syrjäyttivät höyry- ja akkuajoneuvot nopeasti. Sähköautojen ongelmana oli siihenkin aikaan rajalliset tehot, hidas lataus, kehittymättömät akut ja sähköinfrastruktuurin rajallisuus kaupunkien ulkopuolella. [27]

Täyssähköauton rakenne on periaatteessa hyvin yksinkertainen. Kärjistetysti polttomootorin tilalle on laitettu sähkömoottori ja polttoainetankin sijasta auton käyttämä energia on varastoitu ajoakkuun. Sähkömoottorin toimintaa ohjaa taajuusmuuttaja, jonka avulla sähkömoottorilta saatava vääntö on hyvin tasaista ja reagointi on nopeaa. Sähkömoottorilta teho siirretään usein suoraan alennusvaihteiston kautta tasauspyörästölle, joten kytkimiä tai vaihteistoja ei useinkaan tarvita. Nelivetoisen täyssähköauton tapauksessa sähkömoottorit sijaitsevat molemmilla akseleilla. Verrattuna polttomootoriautoon on täyssähköautossa merkittävästi vähemmän liikkuvia ja kuluvia osia. Tämä helpottaa auton huoltoa ja käyttökustannuksia pitkällä aikavälillä. Toisaalta merkittävästi paremman hyötysuhteen ansiosta sähköjärjestelmien hukkalämpöä ei voida hyödyntää ohjaamon lämmittämiseen. Tämä joudutaan hoitamaan sähkövastuksilla ja lämpöpumpuilla. [22]

Täyssähköauton akku on usein kapasiteetiltaan 40–110 kWh riippuen auton koosta ja käyttötarkoituksesta. Pienet ja edulliset kaupunkiautot pärjäävät pienemmällä akkukapasiteetilla, kun iso luksusmaasturi tarvitsee isomman akkukapasiteetin käytännölliseen toimintamatkaan päästäkseen. Yleisesti sähkökäyttöisen henkilöauton energiankulutus vaihtelee 10–30 kWh/100 km välillä ja laskennassa usein käytetään arvoa 20 kWh/100 km. [21] Mitä suuremmaksi ajoneuvon otsapinta-ala kasvaa ja mitä suuremmaksi ajoneuvon paino kuorman kanssa nousee, sitä suuremmaksi energiankulutus ajossa nousee. [29] Erialaisten ajoneuvojen kulutuksia on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Sähköajoneuvojen energiankulutus ja akuston koko. [22]

Ajoneuvo	Energiankulutus (kWh/ 100 km)	Akuston koko (kWh)
Henkilöauto	15–30	40–110
Pakettiauto	20–40	50–100
Kaupunkibussi	100–150	150–400
Jakelukuorma-auto	80–140	150–400
Raskas kuorma-auto tai yhdistelmä	100–200	200–600

Myös ajokeli vaikuttaa paljon sähköajoneuvojen energiankulutuksen määrään. Huonolla ajokelillä ajoalusta on usein epätasaisempi lumesta, loskasta tai vedestä johtuen, mikä nostaa auton vierintävastusta merkittävästi. Toinen merkittävä tekijä on hytin lämpötilan säätäminen halutuksi, sillä sähköautoissa ei juurikaan voida hyödyntää voimalinjan hukkalämpöä samalla tavalla kuin perinteisissä polttomoottoriautoissa. Tämä korostuu erityisesti hiljaisissa ajonopeuksissa ja kylmässä kelissä, jolloin energiankulutus voi nousta moninkertaiseksi verrattuna tilanteeseen, jossa hyttiä ei tarvitse lämmittää. Sama ilmiö näkyy myös ilmastointilaitteen kovana käyttönä erityisen kuumissa keleissä, mikä voi nostaa kulutuksen hiljaisessa vauhdissa jopa kaksinkertaiseksi. Mitä kovempi ajonopeus on, sitä pienemmäksi lämpötilan vaikutukset jäävät, sillä suhteellinen lämmitykseen tai jäähdytykseen käytetty energian määrä pienenee. [28][29] Perinteisten hybridien ja ladattavien ajoneuvojen tyypillisiä ominaisuuksia on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2 Sähköisiä voimalinjoja käyttävien ajoneuvojen koontitaulukko.

	Perinteinen hybridi	Ladattava hybridi	Täyssähköauto
Akuston koko (kWh)	1–2	8–50	30–110
Sähköinen kantama (Km)	~1	10–100	200–500
Sähkömoottori teho (KW)	10–50	40–100	60–400
Polttoaineen kulutus (l/100 km)	4–10	1–10	0
Latausteho verkosta (kW)	0	0–60	60–270

2.2.4 Ladattavien autojen akustot

Sähköiset ajoneuvot on yleensä varustettu kahdella erityyppisellä akustolla: korkeajänniteakulla ja matalajänniteakulla. Korkeajänniteakun (voidaan kutsua myös esimerkiksi ajoakuksi) tarkoitus on toimia ajoneuvon pääasiallisena energianlähteenä ja toimittaa ajamiseen tarvittava energia kolmivaiheisen invertterin kautta pyöriä liikuttavalle sähkömoottorille tai moottoreille. Ajoakku on usein litiumpohjainen ja se voidaan ladata joko ajoneuvon omalla sisäisellä laturilla käyttäen vaihtovirtaa tai suoraan tasasähköllä siihen tarkoitetuilta latauspaikoilta. Matalajänniteakku on usein 12 V lyijyakku, jonka tarkoitus

on toimittaa energiaa ajoneuvon apulaitteille, kuten ohjaamon hallintalaitteille. Matalajänniteakku ladataan korkeajänniteakun energialla DC-DC konverterin avulla. [30][31]

Korkeajänniteakku on kasattu useista yksittäisistä kennoista, joista on koottu sopivan kokoisia moduuleita. Moduulien koko ja määrä vaihtelee paljon ajoneuvoittain sekä ajoneuvon käyttötarkoituksen mukaan. Akuston kokoamisessa on kuitenkin aina huomioitava esimerkiksi käytettävissä oleva tila ja sen muotoilu, valmistuskustannukset, paino, energiatiheys, tarvittava energiasisältö, lämmön haihtuminen ja riittävä akuston mekaaninen vakaus. [32] Nykyisissä sähköajoneuvoissa, jotka suunnitellaan alusta alkaen sähköajoneuvoiksi, on akusto kiinteä osa runkoratkaisua, jolloin suurehko ja painavahkokin akusto saadaan sijoitettua tehokkaasti. Suurjänniteakusto on usein sijoitettu lattian alle etu- ja taka-akselin väliin, joka osaltaan pitää painopisteen matalalla, mutta saattaa hiukan nostaa lattiaa tavanomaista korkeammalle. Monet autonvalmistajat suosivatkin sähköautojen korimalliksi ns. crossover-ratkaisua, joissa lattia on hiukan perinteistä ajoneuvoa korkeammalla.

Itse akkukkenno muodostuu anodista (negatiivinen napa), katodista (positiivinen napa) ja näitä yhdistävästä elektrolyytistä, lisäksi anodin ja katodin välillä on separaattori eristeenä. Napoja kutsutaan myös elektrodeiksi. Elektrolyytti johtavana elementtinä sallii virran virtaamisen anodin ja katodin napojen välillä. Akun toiminta perustuu metallipareihin, jotka pystyvät vaihtamaan elektroneja keskenään kemiallisten hapettumis- ja pelkistymisreaktioiden avulla. Hapettumisen yhteydessä negatiivisesti varautuneelta anodilta vapautuu elektrodeja, jotka kulkevat elektrolyyttiä pitkin separaattorien välissä positiivisesti varautuneelle katodille, jossa ne saavat aikaan pelkistymisreaktion. Varautuneiden elektrodien kulkeminen aiheuttaa sähkövirran. Akkua ladattaessa elektrodit kuljetetaan ”väkisin” elektrolyysin avulla päinvastaiseen suuntaan katodilta anodille, jonka jälkeen elektroneja voi siirtyä taas toiseen suuntaan. Elektrodien liikkuaessa anodilta katodille vapautuu energiaa ja katodilta anodille liikkumiseen tarvitaan energiaa. Erilaiset akkutyyppit perustuvat erilaisiin materiaaleihin anodeissa, katodeissa ja elektrolyyteissä. Kaikki erilaiset akkuteknologiat ovat usein joiltain osin parhaita kompromisseja halutuista ominaisuuksista, kuten käyttöiän, turvallisuuden, hinnan, energiatihedysten, lataussykliä keston tai käytännöllisyyden suhteen. [30][31]

Litiumioniakut ovat yleisin sähköajoneuvoissa käytettävä akkutyyppi. Litiumioniakun edut muihin akkutyyppisiin nähden on korkea energiatiheys, pitkä käyttöikä, pieni itsepurkautumisaste ja helppo valmistustapa. Huonoina puolina litiumioniakuissa on korkea hinta, harvinaiset materiaalit ja joillakin akkutyypeillä räjähdysherkkyys väärinkäytettynä. Säh-

köautoissa on isot ja tehokkaat akut lähellä matkustajia, joten räjähdysherkät kemikaaliyhdistelmät litiumioniakuista eivät ole juurikaan vaihtoehtoina. Turvallisuuden lisäksi akuston energiatiheys on isossa roolissa valmistajien miettiessä akkumateriaaleja, jotta voitaisiin saavuttaa ajoneuvolle pitkät toimintamatkat ja riittävä teho. Mitä pidempiä toimintamatkoja ja korkeampia tehoja kevyeltä akulta vaaditaan, sitä suurempi painoarvo energiatihedelle on annettava ja akkumateriaali voikin vaihdella paljon ajoneuvon käyttötarkoituksen mukaan. Tehokas urheiluauto ja pieni kaupunkiauto eivät lähtökohtaisesti käytä samoja akkumateriaaleja.

Litiumioniakut jaetaan usein eri ryhmiin niiden katodimateriaalin mukaan. Katodin kemialliset ominaisuudet ovat yksi tärkeimmistä tekijöistä akun ominaisuuksien suhteen. Eri vaihtoehtoja on useita mutta muutama yleisin sähköautoissa käytettävä materiaali on alla listattuna:

- **Litiumnikkelimangaanikobolttioksidisi (NMC)**, jossa on hyvä energia- ja tehotehiheys, mutta vain kohtalainen lämpövakaumus, sekä se sisältää eettisesti kyseenalaista kobolttia.
- **Litiumnikkelikobolttialumiinioksidisi (NCA)**, on ominaisuuksiltaan melko samanlainen NMC-akkujen kanssa, eli siinä on hyvä energia- ja tehotehiheys, mutta väärinkäytettynä voi olla vaarallinen, sekä se sisältää eettisesti kyseenalaista kobolttia.
- **Litiumrautafosfaatti (LFP)**, joka on erittäin turvallinen, kestää lämpöä hyvin ja ei sisällä lainkaan kobolttia, mutta vastaavasti energia- ja tehotehiheys ovat ainoastaan kohtalaisella tasolla.
- **Litiummangaanioksidisi (LMO)**, joka omaa matalan energiatihedden, mutta on edullinen ja turvallinen käytettävä. Soveltuu hyvin hybridikatodimateriaaliksi.
- **Litiumkobolttioksidisi (LCO)**, jolla on hyvä energia- ja tehotehiheys, mutta se sisältää kobolttia ja on väärinkäytettynä herkästi vaarallinen.

Katodimateriaaleja voidaan myös yhdistellä toisiinsa ja silloin puhutaan hybridikatodimateriaaleista. Yhdistämällä eri katodimateriaaleja voidaan parhaimmillaan kerätä talteen parhaimmat ominaisuudet eri materiaaleista. Esimerkiksi NMC-akun positiivisena ominaisuutena oleva suuri energiatiheys yhdistettynä LFP-akun hyvään lämmönkestävyyden kanssa antaa hyvän kompromissin energiatihedestä ja turvallisuudesta. [30][33]

2.3 Lataustekniikat

Tämä diplomityö rajautuu ajoneuvoihin, joita pystytään lataamaan sähköverkosta. Ajoneuvojen lataamiseen on muutama erilainen tapa, mutta tavasta riippumatta akkuja ladataan latauslaitteilla. Lataaminen tapahtuu pääsääntöisesti kaapeleilla, mutta lataus voi tapahtua myös virroittimilla tai langattomasti induktiolla. Näistä kaapelilataus on ylivoimaisesti yleisin, virroitinlatausta käytetään jonkin verran raskaiden hyötyajoneuvojen kohdalla ja induktiolatausta on vielä lähinnä erilaisissa prototyypeissä ja tulevaisuuden suunnitelmissa heikon käytännön hyötysuhteen takia. Tämä diplomityö keskittyy tämän kappaleen jälkeen kaapelilataukseen, koska suurin osa latauslaitteista ovat kaapelikäyttöisiä. Seuraavissa alaotsikoissa on esitetty kaapelilataustavat 1–4.

Virroitinlatauksen etuja ovat suuret lataustehot (jopa 600 kW) ja nopea lataaminen ilman, että kuljettajan tarvitsee poistua autosta. Haittapuolina on usein suhteellisen monimutkainen järjestelmä ja korkeat hinnat. Virroitinlatauksessa automatisoitu pantografi nousee esiin ajoneuvon yläpuolelta ja tarttuu kiinni virroittimeen, jota kautta latausvirta johdetaan ajoneuvoon. Vaihtoehtoisesti liikkuva osa voi sijaita laturissa, josta virroitin laskeutuu ajoneuvon katolle yhdistäen virtakiskot. Virroitinlatausta käytetään usein linja-autojen päätepysäkillä pikalataukseen, jolloin linja-auton käyttöastetta voidaan kasvattaa tai vaihtoehtoisesti pienentää tarvittavaa akun kokoa. Virroitinlatauksen lisäksi monessa linja-autossa on usein paikka perinteiselle kaapelilataukselle, jota käytetään pidemmällä tauoilla tai yön yli lautauksessa.[34] Linja-autojen virroitin ja kaapelilataustavat näkyvät kuvassa 6.



Kuva 6. Vasemmalla ylhäällä ajoneuvo saapumassa virroitinlataukseen (pantografii) ja oikealla perinteinen kaapelilataus. [35]

Langaton lataus on vähemmän käytössä oleva teknologia, mutta teknologioiden kehittyessä se voi muuttua erittäin merkittäväksi latauskeinoksi sen helppokäyttöisyyden takia. Langattomassa latauksessa ei ajoneuvoa tarvitse kytkeä erikseen laturiin laisinkaan, vaan lataus hoituu nimensä mukaisesti langattomasti tietyssä paikassa tai esimerkiksi jollakin tietyllä tieosuudella ajon aikana. Paikallaan tapahtuvaa latausta kutsutaan staattiseksi lataukseksi ja ajon aikana tapahtuvaa latausta dynaamiseksi lataukseksi. Langattoman latauksen teknologioita on muutamia, mutta käytännössä kaikki tällä hetkellä käytössä olevat langattomat laturit perustuvat sähkömagneettiseen induktioon. Staattisessa induktiolatauksessa ajoneuvo ajetaan latauspaikalle induktiolevyn päälle, josta lataus-teho siirtyy langattomasti Faradayn lakien mukaan autossa olevaan toiseen induktiolevyyn, josta se johdetaan ajoneuvon akustoon. Lyhyillä siirtoetäisyyksillä induktiolataus toimii hyvin ja kohtalaisen hyvällä hyötysuhteella, mutta heti etäisyyden kasvaessa ja kohdistuksen epäonnistuessa häviöt kasvavat ja lataustehot pienenevät merkittävästi. [36][37]

2.3.1 Lataustapa 1, Mode 1

Lataustavalla 1 tarkoitetaan sähköajoneuvojen lataamista normaalista maadoitetusta korkeintaan 250 V ja 16 A yksivaiheisesta kotitalouspistorasiasta (suko) tai korkeintaan 480 V kolmivaiheisesta standardoidusta pistorasiasta. Lataustavassa 1 latauskaapelissa ei ole mitään suojalaitteita kuten vikavirtasuojakytkintä, joten latauksen turvallisuus perustuu täysin sähköä pistorasiaan syöttävän järjestelmän suojalaitteisiin. Lataustapaa ei suositella sähköautojen lataamiseen, eikä muuhunkaan pitkäaikaiseen lataamiseen, sillä

liitin ja tai pistorasia voi kuumentua. Lataustapa 1 on lähtökohtaisesti tarkoitettu ainoastaan tilapäiseen käyttöön, jos muuta varsinaista lataustapaa ei ole käytettävissä. Lataustapaa 1 käytetään lähinnä kevyiden sähkökäyttöisten ajoneuvojen kuten mopojen ja kevyiden nelipyörien lataamiseen. [22][38]

2.3.2 Lataustapa 2, Mode 2

Lataustavalla 2 tarkoitetaan sähköajoneuvojen lataamista normaalista maadoitetusta korkeintaan 250 V ja 32 A yksivaiheisesta kotitalouspistorasiasta (suko) tai 480 V kolmivaiheisesta standardoidusta pistorasiasta standardin SFS-EN 62752 mukaisella kiinteällä suojalaiteyksiköllä varustetulla latausjohdolla. Lataustapa 2 eroaa lataustavasta 1 hiukan suuremman yksivaiheisen latausvirran osalta ja sen lisäksi lataustavan 2 latausjohdossa on aina kiinteä suojalaiteyksikkö. Suojalaiteyksikössä on sisäänrakennettu viikavirtasuojakytkin ja ohjauselektroniiikka. Ohjauselektroniiikka esimerkiksi kytkee jännitteen kaapeliin vasta sen jälkeen, kun latauspistoke on kytketty ajoneuvoon ja osaa kertoa ajoneuvolle kuinka suuren latausvirran se saa ottaa. Tämä lisää turvallisuutta ja pienentää sähköiskun vaaraa esimerkiksi kaapelin tippuessa kosteaan maahan tai lumeen. Osassa suojalaiteyksiköitä on myös mukana pistotulpan lämpötilan valvonta, joka tiputtaa latauksen tehoa, jos pistotulppa rupeaa lämpenemään liian kuumaksi. Lataustavan 2 latauskaapeli tulee normaalisti ajoneuvon mukana ja sopii lataukseen esimerkiksi mökillä tai kyläillessä. Lataustapaa 2 kutsutaan monesti myös nimellä ”hidas lataus”. Perinteisestä suko-pistorasiasta suositellaan standardin SFS-EN 62752 mukaan ladattavan maksimissaan 8 A virralla, koska niitä ei ole standardoitu pitkäaikaiseen lataamiseen täydellä mitoitusvirralla. Jos rajoitettu 8 A lataus kotitalouspistorasiasta ei riitä, tulee tilalle asentaa vahvennettu kotitalouspistorasia (supersuko), joka on standardoitu kestämään jatkuva 16 A kuormitus. [22][38] Kuvassa 7 on esitetty lataustavan 2 mukainen siirrettävä latauslaite. Pistoke (CEE) kytketään kiinteistön kolmivaiheiseen pistorasiaan ja latauspää (Type 2) kytketään ajoneuvoon, kuvan keskellä näkyy ohjausyksikkö.



Kuva 7. Nordig Plug -lataustavan 2 mukainen kannettava latauslaite voimavirtaan. [39]

2.3.3 Lataustapa 3, Mode 3

Lataustavalla 3 tarkoitetaan sähköajoneuvon lataamista ajoneuvoon sopivalla latausjohdolla standardin SFS-EN 62196-2 mukaisesta sähköautopistorasiasta. Järjestelmä on suunniteltu nimenomaan sähköajoneuvojen lataamista varten ja ohjaus, sekä turvalaitteet ovat kiinteästi mukana latauslaitteessa. Latausjohto voi olla myös kiinteä osa latausasemaa. Maksimivirta lataustavalla 3 on 63 A kolmelta vaiheelta, jolloin saavutetaan maksimissaan 43 kW latausteho. Latausvirta voi vaihdella syöttävän sähköverkon kyvykkyyden mukaan 0–63 A välillä, jolloin latausteho on 0–43 kW. Ladattaessa ajoneuvoa latauspistokkeet lukittuvat vastakappaleeseen joko mekaanisesti tai sähköisesti. Lataustapaan 3 kuuluu myös tiedonsiirtoväylä ajoneuvon ja laturi välillä, jolla varmistetaan ajoneuvon oikea turvallinen kytkentä laturiin, sekä mahdollistetaan älykäs kuormitus ja virran syöttö molempiin suuntiin yhden ampeerin portaissa (laturilta autoon tai autosta laturiin). Lataustapa 3 on suositeltavin sähköajoneuvojen lataustapa ja kansallisen lainsäädännön (Laki liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelusta 478/2017) mukaan julkiset vaihtosähköiset latausasemat ovat lataustavan 3 mukaisia. Lisäksi laki määrittelee, että julkisissa vaihtosähkölatausasemissa tulee mahdollisuuksien mukaan pystyä käyttämään ns. älykkäitä latausjärjestelmiä. Lataustapaa 3 kutsutaan usein myös peruslataukseksi. Laturilta tuleva vaihtosähkö siirtyy auton sisäiselle laturille, joka muuntaa sähkönsä tasasähköksi ja lataa akkua. Ajoneuvojen sisäisten laturien tehot vaihtelevat ajoneuvokohtaisesti ja ovat tyypillisesti 6,6 kW – 22 kW. [22][38]

Suomessa ja muissa Euroopan maissa lataustavassa 3 on hyväksytty käytettävän standardin SFS-EN 62196-2 mukaisia tyyppin 1, 2 ja 3 mukaisia latauspistokkeita. Tyyppin 1

pistoketta (Type 1, ”Yazaki”) käytetään yhdysvaltalaisissa ja japanilaisissa autoissa. Tyypin 1 pistoke on standardoitu alle 250 V yksivaiheiselle jännitteelle ja alle 32 A latausvirroille. [40] Tyypin 1 pistoke on harvemmin käytössä Suomessa pl. jotkut japanilaiset ajoneuvot.

Tyypin 2 pistoketta (Type 2, ”Mennekes”) käytetään eurooppalaisissa ajoneuvoissa ja suurin osa Suomeenkin maahantuotavista autoista käyttää tätä latauspistoketta. Type 2 on standardoitu maksimissaan 480 V kolmivaiheiselle ja 250 V yksivaiheiselle jännitteelle ja maksimissaan 63 A latausvirroille kolmivaiheisesti. Yksivaiheinen latausvirta voi olla jopa 70 A. [40] Tyyppi 2 on eurooppalaisen regulaation mukainen ja EU:n tavoite onkin ohjata käyttämään tyypin 2 mukaisia vaihtovirtalatauspistokkeita. EU regulaation mukaan sellainen tulisi löytyä kaikista EU alueen julkisista vaihtovirtalatauspaikoista, jotka halutaan laskettavaksi mukaan EU:n jakeluinfradirektiiviin julkisista latauspaikoista suhteessa sähköajoneuvoihin. [18][22] Lataustavan 3 mukainen Type 2 pistoke ja pistorasia on esitetty kuvassa 8. Lähtökohtaisesti kaikki uudet Euroopan markkinoille julkaistavat sähköautomallit ovat varustettu Type 2 latausportilla.

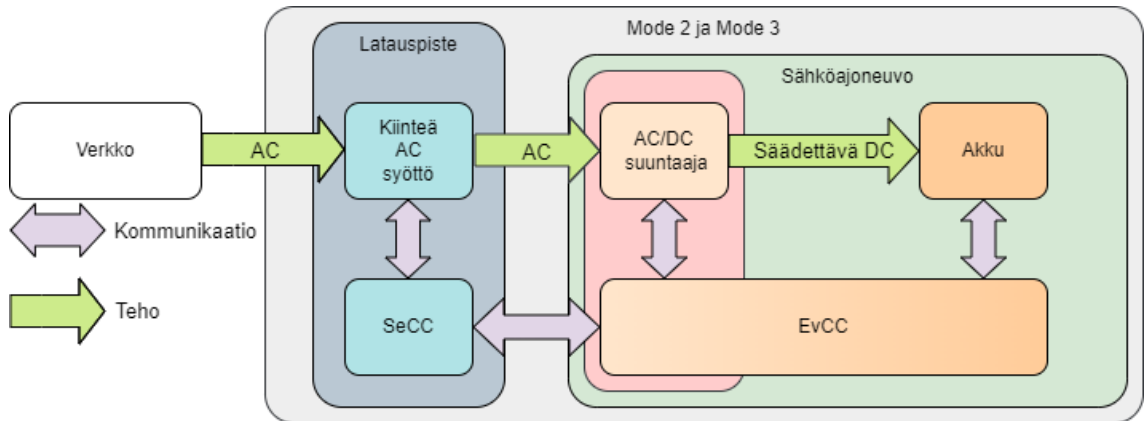


Kuva 8. Tyypin 2 pistorasia ja ”Mennekes”-pistoke. [41]

Tyypin 3 pistoke (Type 3, ”Scame”) on Eurooppaan standardoitu latauspistoketyyppi, joka on lähinnä käytössä enää Italiassa ja Ranskassa, tyypin 2 pistokkeen tullessa valituksi EU:n yleiseksi konfiguraatioksi. Pistoke on standardoitu 480 V kolmivaiheiselle tai 250 V yksivaiheiselle jännitteelle ja maksimissaan 63 A latausvirralle. [40]

Lataustavoissa 1–3 akuston lataaminen tehdään sähköajoneuvon omalla laturilla ja latauslaitetoimittajan tai latausoperaattorin tehtävänä on ainoastaan tarjota sähköverkon teho turvallisesti ja helposti ajoneuvon laturin käyttöön. Latauslaite ja ajoneuvo kommunikoivat tavoissa 2 ja 3 vähintään sen verran, että toiminta on turvallista, mutta kommunikointiin voi sisältyä myös tehorajoituksia tai latauksen ajastamista. Havainnekuva

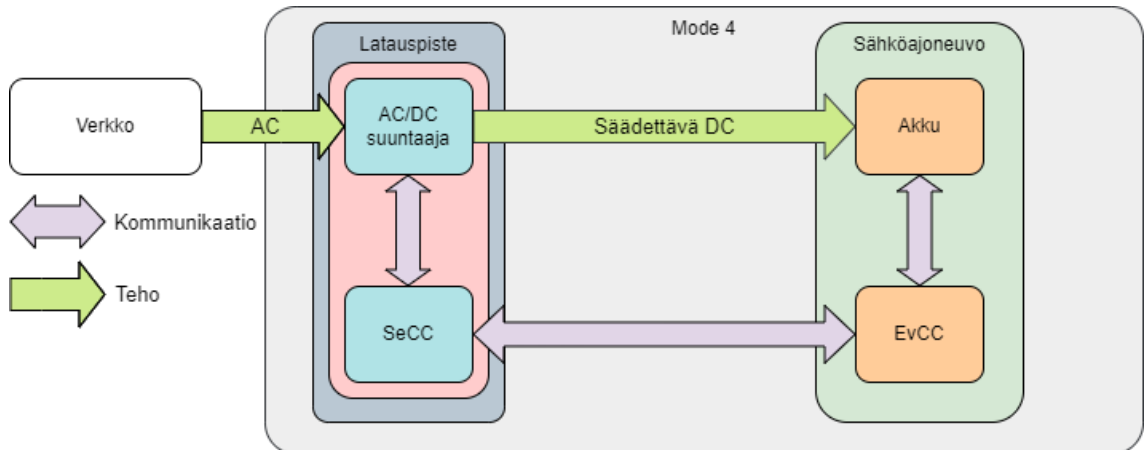
lataustapojen 2 ja 3 kommunikaatiosta sekä lataustehon siirtymisestä on esitetty kuvassa 9. Kuvassa SeCC:llä tarkoitetaan latauslaitteen ohjausyksikköä (EV Supply Equipment Communication Controller) ja EvCC:llä tarkoitetaan sähköajoneuvon ohjausyksikköä (Electric Vehicle Charging Controller).



Kuva 9. Lataustapojen 2 ja 3 tehon ja kommunikaation havainnekuva. Muokattu eri lähteistä.

2.3.4 Lataustapa 4, Mode 4

Lataustavalla 4 tarkoitetaan tasasähköllä tapahtuvaa latausta. Tasasähkölatauksessa päästään selkeästi korkeampiin tehoihin latauksen suhteen, mutta sitä varten tarvitaan tehokas ja älykäs tasasähkölaturi. Tasasähkölatauksessa auton oma sisäinen vaihtovirtalaturi ohitetaan ja akustolle syötetään teho suoraan tasasähkölaturilta. Tämä asettaa tasasähkölaturille vaihtosähkölaturia selkeästi kovemmat vaatimukset. Havainnekuva lataustavan tehon siirtymisestä ja kommunikaatiosta on esitetty kuvassa 10. [22][38]



Kuva 10. Tehon ja kommunikaation havainnekuva lataustavasta 4. Muokattu eri lähteistä.

Tasasähkölatauksesta käytetään usein myös nimitystä pikalataus tai teholataus. Nykyiset teholaturit pystyvät syöttämään ajoneuvoihin lataustehoa 50–350 kW, mutta latausteho riippuu paljon ladattavasta ajoneuvosta ja sen kyvykkyydestä ottaa latausta vastaan. Lataustavan 4 latureissa latauskaapeli on aina kiinteä osa laturia ja latauspistokkeena käytetään sähköautojen lataukseen tarkoitettuja standardin SFS-EN 62196-3 mukaisia pistokkeita. Latauskaapelissa on mukana tiedonsiirtöväylä, jonka avulla tiedonsiirto laturin ja auton välillä tapahtuu. Tiedonsiirron ansiosta pystytään varmistamaan, että laturi on kytketty autoon turvallisesti ennen latauksen aloitusta, sekä hallitsemaan latauksen kuormitusta. [22][38]

Lataustavan 4 latauspistokkeita koskee Euroopassa standardi SFS-EN 62196-3. Se määrittelee neljä hyväksyttyä konfiguraatiota AA ("CHAdeMO"), BB (GB/T), EE (CCS Combo 1) ja FF (CCS2 Combo 2). [42]

CHAdeMO- pistoke on standardoitu 1000 V tasasähkölle ja maksimissaan 400 A virralle. CHAdeMO-pikalatausliitäntä löytyy lähinnä japanilaisista ajoneuvoista, joita Suomessa on jonkin verran. Uudet julkaistavat japanilaisetkin automallit tuodaan Eurooppaan CCS2-latausliittimellä. [42]

GB/T-liitäntä on standardoitu 950 V tasajännitteelle ja maksimissaan 250 A virralle. GB/T- liitäntä on käytössä Kiinan markkinoilla ja Suomessa se on lähes täysin tuntematon. [42]

CCS1 Combo 1 on mitoitettu 1000 V tasajännitteelle ja maksimissaan 400 A virralle. CCS1 on käytössä Pohjois-Amerikan markkinoilla. [42]

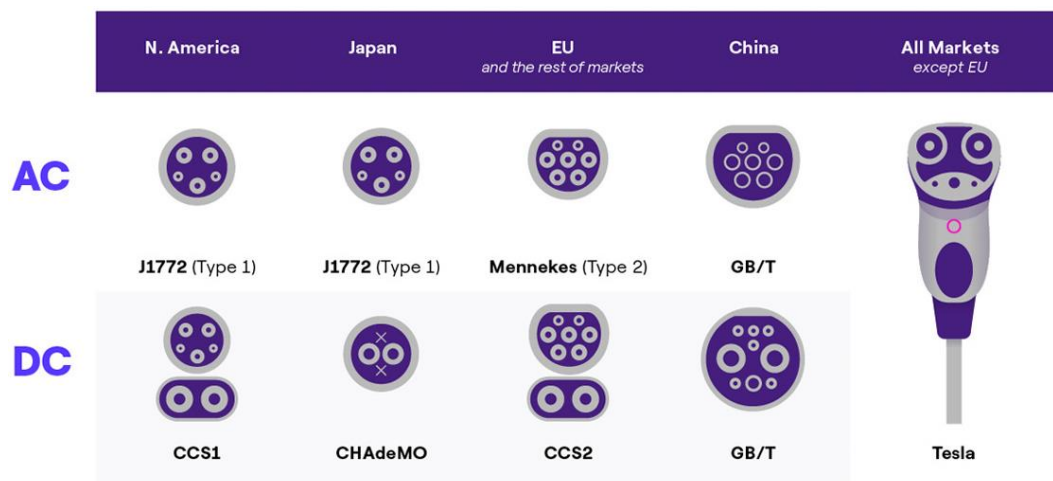
CCS2 on mitoitettu samoin kuin CCS1, mutta toteutus on Type 2:sta mukaileva. CCS2 on hallitseva konfiguraatio niin Euroopassa kuin Suomessakin. EU:n jakeluinfra-direktiivin

mukaan julkisilta DC-latauspaikoilta tulee löytyä CCS2 latauspistoke, joka on esitelty kuvassa 11. [18][42] Lähtökohtaisesti kaikki uudet Euroopan markkinoille julkaistavat sähköautomallit ovat varustettu CCS2 latausportilla.



Kuva 11. CCS2 (Combo 2) konfiguraation mukainen pikalatausliitin. [41]

Kaikki standardoidut latauspistoketyypit on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Eri puolilla maailmaa käytettävät latausliittimet. [43]

2.4 Vehicle-To-X

Vehicle-To-Everything tai V2X -ratkaisut tarkoittavat yleisesti tilannetta, jossa ajoneuvosta siirretään energiaa tai informaatiota toisiin sovelluksiin. V2X jaetaan useampaan alatermiin, joita yleisimpiä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 V2X -ratkaisujen alatermejä. [44]

Nimitys	Selitys	Käyttö
Vehicle-To-Load (V2L)	Yhteys kuormaan	Piensähkölaitteen käyttö ilman sähköverkkoa, kuten grillin käyttö ajoneuvon akustosta
Vehicle-To-Home (V2H)	Yhteys talon sähköihin	Kodin sähköverkkoon syöttäminen sähkökatkon, kuormitushuipun tai hintapiikin aikana
Vehicle-To-Grid (V2G)	Yhteys sähköverkkoon	Kysyntähuippujen tasaaminen, hinnan vaihtelun hyödyntäminen, sähkön myynti verkkoon
Vehicle-To-Vehicle (V2V)	Yhteys ajoneuvoon	Auto lähettää tietoa toiselle ajoneuville, esimerkiksi tietyöstä
Vehicle-To-Network (V2N)	Yhteys tietoverkkoon	Tiedon jako esimerkiksi tieliikenneonnettomuudesta
Vehicle-To-Pedestrian (V2P)	Yhteys jalankulkijoihin	Tiedon jako esimerkiksi kulman takana olevasta jalankulkijasta
Vehicle-To-Infrastructure (V2I)	Yhteys infrastruktuuriin	Tieviittojen ja -merkkien tunnistaminen, vaikka ne olisivat näkymättömissä
Vehicle-To-Device (V2D)	Yhteys toiseen laitteeseen	Ajoneuvo tunnistaa oikean kuljettajan esimerkiksi älypuhelimien avulla

Tässä diplomityössä keskitytään ainoastaan Vehicle-To-Grid-ratkaisuihin ja hiukan Vehicle-To-Home-ratkaisuihin, sillä vain niillä käytännössä pystytään vaikuttamaan millään tavalla sähköverkon tilaan. Teknisesti ja sähköauton tai latauspisteen näkökulmasta V2G ja V2H ratkaisut eivät juuri poikkea toisistaan muuten kuin että toisessa näistä johdetaan sähköä sähköverkon suuntaan ja siihen tarvitaan sopimus verkkoyhtiön kanssa. Ilman yhteistyötä verkkoyhtiön kanssa verkkoon ei saa koskaan syöttää tehoa sähköturvallisuuden takia.

Vehicle-To-Grid, V2G tai kaksisuuntainen lataus tarkoittaa tilannetta, jossa ajoneuvon akustosta pystytään purkamaan energiaa takaisin verkkoon päin. Sähköajoneuvon akuston hyödyntämiseksi energiamarkkinoilla on tehty paljon tutkimuksia ja selvityksiä, mutta käytännön ratkaisut suuressa mittakaavassa ovat vielä odottaneet tuloaan. Ajoneuvosta verkkoon päin syöttäminen voisi olla tarkoituksenmukaista esimerkiksi erilaisissa sähköverkon poikkeustilanteissa, kuten paikkaamaan hetkellistä tehopulaa sähkömarkkinoilla. Sähköjärjestelmän poikkeustilanteista lisää diplomityön kappaleessa 3. [22][44][45]

Vehicle-To-Grid teknologia mahdollistaa sähköajoneuvon hintavan akuston hyötykäytön muuhunkin kuin ainoastaan ajoneuvon kuljettamiseen. Akuston hyötykäyttö ja siitä saatavat säästöt tai tuotot saattaisivat alentaa kynnystä vaihtaa sähköajoneuvoon. Mahdollisia käyttökohteita ajoneuvon akustolle ja V2G-teknologialle voisivat olla esimerkiksi:

- Suojautuminen sähkön hintapiikeiltä

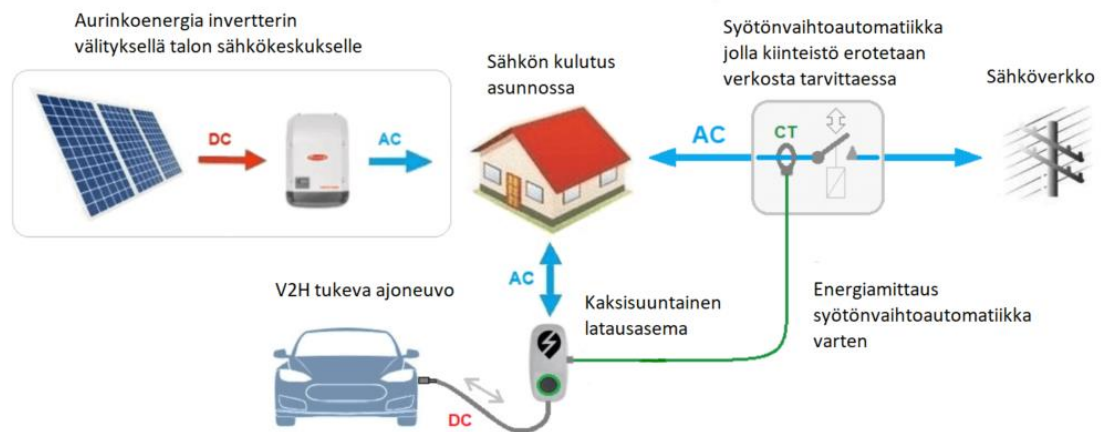
- Uusiutuvan energian suuremman hyötykäytön mahdollistaminen
- Akuston käyttö varavoimalähteenä sähköverkon keskeytystilanteessa
- Kysyntäjousto
- Osallistuminen sähkön reservimarkkinoille aggregaattorin avulla

Konkreettisempänä esimerkkinä aurinkopaneeleilla varustetussa omakotitalossa asuva sähköautoilija, joka haluaisi maksimoida uusiutuvien energialähteiden käytön ja minimoida verkosta ostettavan sähkön kustannukset. Sähköajoneuvon akkua ladataan silloin kun uusiutuvaa sähköntuotantoa on paljon saatavilla ja se on edullista. Silloin kun esimerkiksi säästä riippuvaista uusiutuvaa sähköenergiaa ei ole saatavilla tai se on kallista, ohjataan kulutukseen energiaa sähköauton akustosta. Kuormitushuippujen leikkaaminen sähköajoneuvon akustolla pienentäisi myös sähkön tuotannon ja sähköverkon huipukuormituksia ja sitä kautta kustannuksia, millä pitäisi ainakin teoriassa olla alentava vaikutus sähkön hintaan ja siirtomaksuihin.

V2G ja V2H -ratkaisuihin akuston tasajännite täytyy muuttaa invertterillä eli vaihtosuuntaajalla käyttökelpoiseksi vaihtosähköksi joko ajoneuvossa itsessään tai ajoneuvoon yhdistetyssä latausasemalla. Koska eri maissa on käytössä erilaisia jännite- ja taajuustasoja, sekä muita erilaisia verkkovaatimuksia, on soveltuva invertteri asennettava käytännössä latauslaitteiston yhteyteen, sillä ajoneuvoihin niitä ei valmistajan ole taloudellisesti järkevä sijoittaa. V2L järjestelmät ovat usein yksivaiheisia ja niissä invertteri on sijoitettu ajoneuvoon kuorman ottamiseksi esimerkiksi grilliä varten retkeillessä. Joissakin maissa, missä kiinteistöjen sähköverkot ovat yksivaiheisia, V2H ratkaisut ovat helpompia toteuttaa yksinkertaisemman invertterin ansiosta. Kolmivaiheinen verkkoon syöttävä invertteri on käytännössä samankaltainen mitä kolmivaiheisina verkkoon syöttävinä aurinkosähköinverttereinä käytetään, joten teknologia on jo tuttua markkinoille. Myös suurimmat byrokratian murheet on jo selätetty siinä vaiheessa, kun yksityisten kiinteistöjen tuottamaa aurinkoenergiaa on ruvettu myymään takaisin sähköyhtiöille päin.

Turvallisuus on yksi kriittisimmistä tekijöistä, joita pitää ottaa huomioon V2G ja V2H ratkaisuihin. Kaikkien sähköasennuksien tulee noudattaa SFS 6000 -standardin vaatimuksia, jossa esimerkiksi kielletään sähkönsyöttö ajoneuvosta verkkoon teollisuus- tai kotitalouspistorasian kautta. Sähkönsyöttö on toteutettava jo edellisissä kappaleissa mainitun SFS-EN 62196 mukaisella pistorasialla ja pistokkeella. Jos ajoneuvossa on vaihtovirransyöttö, täytyy ajoneuvovalmistajalta varmistaa, miten se sallii ominaisuuden käytön. Vaikka ajoneuvossa on vaihtovirtausottomahdollisuus, ei se välttämättä ole tarkoitettu tai suunniteltu toimimaan koko kiinteistön sähkön syöttäjänä. Eri ajoneuvoissa voi

olla erilaiset suojalaitteet sähkön syöttöä varten, joten kahdensuuntaista latausta suunniteltaessa on varmistettava turvallisuudesta riippumatta siitä mikä ajoneuvo laturiin kytketään. Verkkoon syötettäessä verkkoyhtiöllä voi olla omia lisävaatimuksia turvallisuuden varmistamiseksi tai sähkön laadun suhteen. Tärkeimpiä huomioita turvallisuuden kannalta on estää, ettei ajoneuvosta voida syöttää tehoa jakeluverkkoon sen ollessa jännitteetön. Jos mikä tahansa sähköä tuottava laitteisto kuten aurinkopaneelit tai tässä tilanteessa energiavarasto toimii varavoimalana sähkökatkon aikana, täytyy laitteisto varustaa kytkimellä tms. syötönvaihtoautomaatiikalla, joka irrottaa laitteiston sähköverkosta vikatilanteen sattuessa tarpeeksi nopeasti. Tämä on välttämätöntä sähköverkon viankorjaus- ja asennustöiden turvallisuuden kannalta, jotta sähköverkko pysyy varmasti jännitteettömänä, eikä verkkoon syötetä tehoa ajoneuvoista. Kuvassa 13 on esimerkki varavoimana toimivasta V2H -järjestelmästä.



Kuva 13. Havainnekuva kaksisuuntaisesta DC-latauksesta. [46]

Aina verkkoon tai kiinteistöön syöttäessä on noudatettava ajoneuvovalmistajan ohjeita. Tällä hetkellä kaksisuuntaista DC latausta tukee lähinnä jotkut Japanilaiset CHAdeMo - pistokkeelliset sähköajoneuvot. Kaksisuuntaiseen lataukseen soveltuvan ajoneuvon lisäksi tarvitaan latauslaite, joka pystyy tukemaan kaksisuuntaista latausta. Kaksisuuntaisen latauslaitteen tehoelektroniikan pitää huolehtia siitä, että sen tuottama vaihtosähkö on tarpeeksi laadukasta ja tarvittavien kriteereiden mukaista, jotta sähköverkkoon voidaan liittyä. Tällä hetkellä joitakin kaksisuuntaisia DC-latureita löytyy markkinoilta, mutta käytännössä teknologia ja laitteisto ei ole vielä käytössä. Suomessa on tiedettävästi ainoastaan yksi kaksisuuntaista latausta tukeva julkinen latausasema Helsingin Suvilahdessa, joka rakennettiin osana EU-hanketta tutkimustarkoituksessa. [47]

2.5 Kuormanhallinta ja älykäs lataus

Liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelua koskevan lain mukaan älykkäällä latausjärjestelmällä tarkoitetaan latausjärjestelmää ”joka sisältää tietoliikenneyhteyden ajoneuvon ja latauslaitteen välillä sekä tietoliikenneyhteyden latauslaitteen ja latauspalveluntuottajan välillä mahdollistaen lataustapahtuman reaaliaikaisen mittauksen ja ohjauksen sekä lataustehon porrastetun säädön ylöspäin ja alaspäin kesken lataustapahtuman ilman, että lataus keskeytyy.” Kaikki EU-alueen julkiset latauspisteet tulee varustaa mahdollisuudella älykkäälle lataukselle. [19]

Mode 3 ja Mode 4 latausjärjestelmät mahdollistavat latausjärjestelmän maksimilataustehon säätelyn eli kuormanhallinnan. Kuormanhallinnan avulla voidaan varmistaa, että ensisijaisesti esimerkiksi kiinteistön muuhun käyttöön riittää sähköä ja vasta toissijaisesti voidaan ladata ajoneuvoja. Käytännössä siis niin, että ajoneuvo saa ladattua haluamansa verran latausjärjestelmästä ainoastaan, jos kuormanhallinta ei sitä erikseen rajoita. Ilman kuormanhallintaa on vaarana, että auto ja latausjärjestelmä ottavat niin paljon tehoa, että jokin sulake laukeaa järjestelmästä [22][48]

Kuormanhallinta perustuu usein sähköisiin mittauksiin, jolla valvotaan erityisesti lataukseen käytettäviä tehoja ja lämpötiloja. Kuormanhallinnan avulla tehoa voidaan säädellä käytettävissä olevan kapasiteetin ja latausjärjestelmän kyvykkyyden mukaan. Dynaamisella lataustehon ohjauksella tarkoitetaan ratkaisua, jossa lataustehoa säädetään automaattisesti saatavilla olevan kapasiteetin tai muun muuttuvan suureen mukaan. Älykäästä latausta voidaan joutua tekemään joko paikallisesti tai taustajärjestelmäpohjaisesti. Paikallisesti lataustehoa voi joutua dynaamisesti ohjaamaan esimerkiksi, kun kiinteistön muu sähkön kulutus tai latausjärjestelmässä olevien ajoneuvojen määrä kasvaa liikaa suhteessa sähkön syötön kyvykkyyteen. Latausjärjestelmän kaapelointi voi asettaa myös maksimikuormituksen rajan mitä suuremmaksi latausteho ei voi kasvaa. Standardin SFS 6000-7-722 mukaan latausjärjestelmässä, jossa ei ole kuormanhallintaa tulee käyttää kuormituskerrointa 1, eli syöttö pitää mitoittaa kaikkien latauspisteiden maksimitehon mukaisesti. Kuormanhallinnan avulla tästä raskaasta mitoitusavasta voidaan joustaa ja mitoittaa järjestelmä lähemmäksi todellista keskimääräistä lataustehoa. [22][49][52]

Dynaaminen kuormanhallinta perustuu aina riittävän nopeaan mittausdataan ja sen tarpeeksi nopeaan mittaustietojen siirtämiseen kuormanhallinnalle. Standardin IEC 61851 mukaan ajoneuvon pitää reagoida muuttuneeseen virtarajaan maksimissaan 5 sekunnissa uuden virtarajan saamisesta. Ennalta määritelty kuormanhallinta pyörii paikallisella

tietokoneella latausjärjestelmän yhteydessä, mutta sille voidaan antaa tarvittaessa kommentoja myös pilvipohjaisen taustajärjestelmän kautta. Paikallisella tietokoneella varmistetaan latausjärjestelmän toiminta, vaikka tietoliikenneyhteyksissä pilvipohjaiseen taustajärjestelmään eivät aina toimisikaan. Taustajärjestelmäpohjaisesti tehtävä älykäs lataus voi perustua esimerkiksi sähköjärjestelmän tilaan, kuten hetkellisesti korkeaan sähkön hintaan. Tällaisessa tapauksessa pilvipohjaisesta taustajärjestelmästä lähetetään uusi tieto paikalliselle latausjärjestelmälle, joka rupeaa toteuttamaan kuormanhallintaan päivitetyn tiedon pohjalta. Taustajärjestelmästä tulevat ohjaukset tulevat aina pienellä viiveellä tiedonsiirron viiveiden takia. [22][49][52]

Useamman latauspisteen latausjärjestelmässä kuormanhallinnan tehonjako voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Vaihtoehtoina on käytännössä kaikkien latauspisteiden tasa-
puolinen tehon rajoittaminen tai joidenkin tiettyjen pisteiden priorisointi. Priorisointi voi tapahtua esimerkiksi niin, että viimeiseksi lataukseen tulleet saavat enemmän virtaa pidemmän aikaa latauksessa oleviin verrattuna. Haastavaksi priorisoinnin tekee myös tilanne, jossa latauspisteelle sallitaan esimerkiksi 16 A latausvirta kuormanhallinnalta, mutta ajoneuvo kykeneekin ottamaan vastaan ainoastaan 10 A. Koska ajoneuvo vastaanottaa lataustehon rajoituksen Control Pilot signaalilla latauskaapelia pitkin, mutta ei pysty lähettämään sitä pitkin latautumistietoja takaisin laturille, jää potentiaalista latausvirtaa hyödyntämättä 6 A. Tarkkuutta kuormanhallintaan saadaan esimerkiksi latauspistekohtaisella virtamittauksella. [52]

2.6 Kommunikointi ja taustajärjestelmät

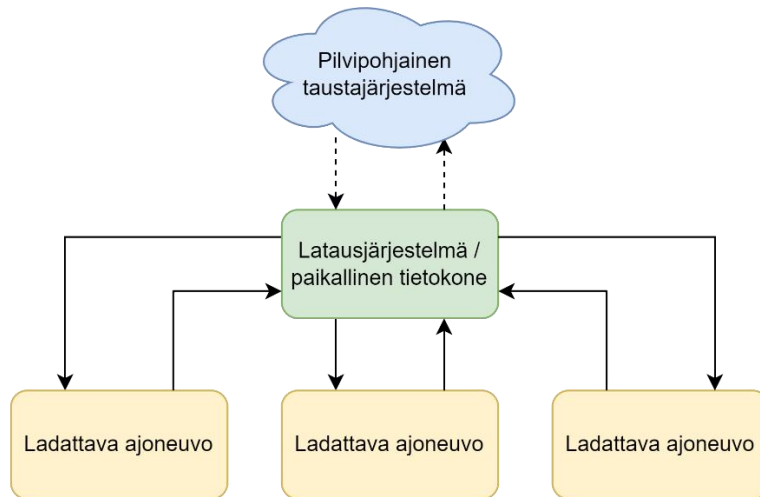
Kaikissa latausratkaisuissa ei välttämättä tarvita minkäänlaista taustajärjestelmää latausjärjestelmän toteuttamiseksi, mutta heti kun lataaja täytyy tunnistaa ja laskuttaa eri kiinteistön käyttäjiltä, muuttuu jonkinlainen taustajärjestelmä lähes pakolliseksi. Latausjärjestelmät pystytään rakentamaan niin, että jokainen lataustapahtuma pystytään yksilöimään ja laskuttamaan lataajalta. Tällöin latausratkaisulta vaaditaan energiamittausta sekä käyttäjätunnistusta ja jonkinlainen tausta-/ohjausjärjestelmä. Taustajärjestelmään voidaan yhdistää esimerkiksi lataustapahtumien tietojen kerääminen ja käyttäjähallinta, laskutus, laturin etähallinta tai huoltojen automaattinen tilaaminen. [22]

Latauslaitteella käyttäjän tunnistaminen ja latauksen autentikointi voidaan toteuttaa joko paikallisesti latauslaitteella tai sovelluspohjaisesti. Paikallinen tunnistautuminen toteutetaan usein RFID-lätkällä (Radio Frequency Identification), joka on yhdistetty latauspalvelutuottajan asiakasjärjestelmään. Muita paikallisia tunnistautumistapoja voi olla esimerkiksi PIN-koodi tai maksupäätte, jossa tunnistautuminen ja maksaminen tapahtuu

luotto- tai maksukortilla. Plug&charge ominaisuus eli latauksen autentikointi latauskaapelin kytkeytymisellä on käytössä esimerkiksi Teslalla, mutta laajenemassa tulevaisuudessa myös laajempaan käyttöön, mikäli ajoneuvo on ISO 15118 -standardin mukainen. Sovelluspohjaisessa tunnistautumisessa käyttäjä aktivoi latauslaitteen puhelinsovelluksen avulla, jolloin autentikointi on tapahtunut. [22]

Latausoperaattorien ja latausasemien välinen kommunikointi tapahtuu pääasiassa avoimen OCPP (Open Charge Point Protocol) -protokollan avulla. OCPP-protokollan toimintaperiaatteena on luoda avoin ja yhtenäinen tiedonsiirtoyhteys latauspisteen ja sen taustajärjestelmän välille. Yhteyden avulla pystytään valvomaan ja hallitsemaan lataustapahtumia. Protokolla on avoin sekä kaikille toimijoille yhtenäinen, ja se mahdollistaa mm. latausoperaattorin kilpailuttamisen sekä varmistaa toiminnan jatkuvuuden esimerkiksi jonkun toimijan poistuessa markkinoilta. Protokollan avulla myös eri aikaan tai eri laite-toimittajan laitteilla valmistuneet latausratkaisut voidaan yhdistää suurella todennäköisyydellä osaksi älykästä latausjärjestelmäkokonaisuutta. Suomessa on pääsääntöisesti käytössä OCPP 1.6 versio, mutta tulevaisuudessa ollaan siirtymässä 2.0.1 versioon, joka helpottaa entistä älykkäämmän latauksen järjestämistä ja mm. kaksisuuntaisen latauksen toteutusta.

Käytännössä latausjärjestelmän tietokoneen ja taustajärjestelmän välinen yhteys on verkon yli tapahtuvaa tiedonsiirtoa ja latausjärjestelmän sekä ladattavien ajoneuvojen välinen yhteys perustuu fyysiseen kommunikaatioon. Havainnekuva kommunikaatiosta esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Havainnekuva latausjärjestelmän kommunikoinneista.

Kappaleessa 2.3 esitellyissä erilaisissa lataustavoissa tarvitaan erilaisia kommunikaatiotratkaisuja latausjärjestelmän ja ladattavan ajoneuvon välille. Standardin mukaan perustason kommunikaatiota (basic signalling), joka sisältää latauksen kannalta välttämättömät tiedot, toteutetaan Pulse Width Modulation (PWM) -teknologialla ja tämä edellytetään lataustavoissa 2, 3 ja 4. PWM:ssä lähtösignaalin jännitteen suuruutta ja kestoa suhteessa pulssin pituuteen säätelemällä saadaan välitettyä standardoituja viestejä. PWM-kommunikaatiolla laturi ja ladattava ajoneuvo vaihtavat tietoja keskenään latausjärjestelmän tilasta, joka viestitään jännitteen suuruudella (± 12 V) ja sallitun latausvirran suuruudesta, joka viestitään pulssin aktiivisen syklin pituudella (duty cycle). [49][50]

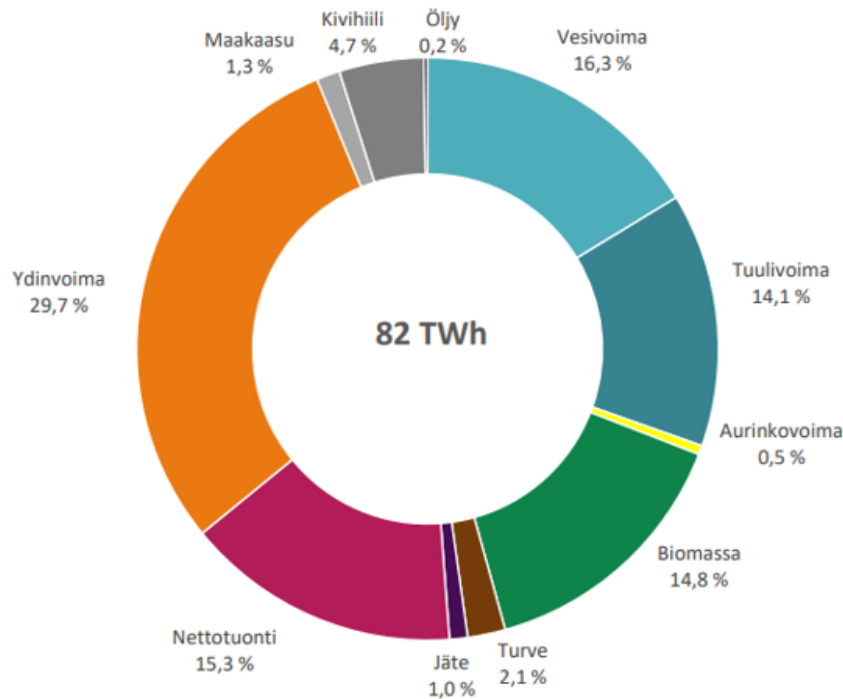
Lataustavassa 4 perustason kommunikaation lisäksi edellytetään korkean tason kommunikointia (High Level Communication, HLC), joka perustuu kaksisuuntaiseen digitaaliseen kommunikointiin. CHAdeMO- ja GB/T-konfiguraatioissa käytetään korkean tason kommunikaation Controller Area Network eli CAN-väylää ja CCS-konfiguraatiot käyttävät Power Line Communication eli PLC-tekniikkaa. Sekä peruskommunikointi, että korkean tason kommunikointi perustuu erillisiin kommunikointijohtimiin eli Control Pilot (CP), joka löytyy lataustavan 2, 3 ja 4 kaapeleista, joilla muodostetaan fyysinen yhteys latausjärjestelmän ja ladattavan ajoneuvon välillä. Kommunikoinnista löytyy lisää standardeista SFS-EN IEC 61851 ja SFS-EN ISO 15118. [49]

3. SÄHKÖMARKKINAT

3.1 Suomen sähkömarkkinat

Suomi ja muut pohjoismaat ovat olleet edelläkävijöitä sähkömarkkinoiden vapautumisessa, kun sähkön myynti ja tuotanto avautuivat kilpailulle vuonna 1995. Vapautuneet sähkömarkkinat ovat parantaneet sähkömarkkinoiden tehokkuutta, mikä on johtanut erittäin hyvään sähkön laatuun, alhaisiin sähkön hintoihin ja kehittyneisiin innovaatioihin alalla. [53]

Markkinaehtoiset sähkömarkkinat ovat suosineet viime aikoina uusiutuvia energianlähteitä niin Suomessa kuin muissakin pohjoismaissa ja tätä murrosta perinteisistä saastuttavista fossiilisista energianlähteistä uusiutuviin energianlähteisiin kutsutaan energiamurrokseksi. Suomen tuulivoimakapasiteetti kasvoi vuodesta 2021 vuoteen 2022 jopa 76 prosenttia, kattaen 14,1 prosenttia koko Suomen sähköntuotannosta. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin on esitetty alla olevassa kuvassa 15. Suomen sähköntuotannosta 89 % oli hiilidioksidivapaata vuonna 2022. [54]



Kuva 15. Sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti 2022. [54]

Lähtökohtaisesti sähkön varastointi on kallista ja haastavaa, joten sähkön tuotanto ja kulutus on oltava jatkuvasti tasapainossa. Kustannustehokkain tapa varmistaa yhteiskunnan sähkönsaanti ja toteuttaa kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen, on toimivat ja tehokkaat sähkömarkkinat. Tehokkailla sähkömarkkinoilla muodostuva sähkön hinta ohjaa markkinatoimijoiden sähkön tuotanto- ja kulutuspäätöksiä lyhyellä aikavälillä ja samalla ohjaa investointeja pitkällä aikavälillä. Sähkömarkkinoita valvoo Suomessa Energiavirasto, jonka tehtäviin kuuluu valvoa sähkö- ja maakaasumarkkinalainsäädännön noudattamista ja edistää alan kilpailuun perustuvan markkinan toimivuutta. [53][55]

Sähkömarkkinat muodostuvat sähköntuotannosta, siirtoverkkoliiketoiminnasta, sähkönjakeluverkkoliiketoiminnasta ja sähkökaupasta. Sähkömarkkinoiden toimivuus perustuu sähkön kuluttajien muodostamaan kysyntään ja sähkön tuottajien tuottamaan tarjontaan. Jotta kysyntä ja tarjonta voidaan yhdistää, tarvitaan tähän sähköverkkoyhtiöitä, jotka mahdollistavat fyysisesti sähkön tuottajan ja kuluttajan yhteyden toisiinsa. Verkkoyhtiöt jakautuvat Suomessa kantaverkkoyhtiöön ja jakeluverkkoyhtiöihin. Kantaverkkoyhtiö siirtää voimalaitoksilta sähköä suoraan suurkuluttajille sekä jakeluverkkoyhtiöille. Jakeluverkkoyhtiöt siirtävät sähköä edelleen omille asiakkailleen. Hajautetun pientuotannon kuten kiinteistöjen omien aurinko- ja tuulivoimalaitosten myötä tuotantoa on siirtynyt myös suoraan pienjänniteverkkoihin ja omaa pientuotantoa omaavat kuluttajat pystyvät myymään sähköä myös sähkömarkkinoille. Suomessa sähkön siirrosta vastaa valtakunnallinen kantaverkkoyhtiö ja sähkön jakelusta alueelliset jakeluverkonhaltijat. Sähkön

tuotanto ja kaupankäynti on vapaan kilpailun piirissä, mutta siirto- ja jakeluverkot toimivat alueellisessa monopoliasemassa. Suomen sähköjärjestelmä on osa pohjoismaista järjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Pohjoismainen sähköjärjestelmä on yhdistetty tasasähköyhteyksillä Keski-Euroopan, Venäjän ja Baltian järjestelmiin. [53][55]

Kuluttajan sähkön kokonaishinta muodostuu sähköenergian tuottamisen ja myynnin muodostamista kustannuksista, sähkön siirron kustannuksista ja veroista. Kaikki kolme segmenttiä muodostavat lopputuotteen hinnasta tavalliselle henkilöasiakkaalle noin kolmanneksen. Kantaverkon eli Fingridin osuus kokonaiskustannuksesta on muutaman prosentin luokkaa. Sähkön siirron tai verojen määrään ei lyhyellä aikavälillä juuri ulkopuoliset tekijät vaikuta, mutta energian hinta voi vaihdella paljonkin kysynnän ja tarjonnan mukaan, mikä on huomattu nyt varsinkin viime vuosina.

3.1.1 Sähköpörssi

Sähköllä käydään kauppaa sähköpörssissä, joka fyysisten tuotteiden kohdalla Pohjoismaissa on esimerkiksi Nord Pool ja EPEX Spot ja finanssituotteiden osalta Nasdaq Commodities. Sähköpörssissä sähkön markkinahinta määräytyy avoimesti ja neutraalisti kysynnän ja tarjonnan perusteella. Sähköpörssin tuotteet jaetaan fyysisiin markkinoihin ja johdannaismarkkinoihin, joissa fyysisillä markkinoilla kauppa päätty aina fyysiseen sähkön toimitukseen. Seuraavissa kappaleissa on esitelty eri sähkömarkkinoita aikajärjestyksessä kaukaisimmasta markkinasta alkaen aina toimituksen jälkeiseen taseselvitykseen asti. Sähkömarkkinoiden rakenne on esitetty kuvassa 16. [53][56]

Finanssimarkkinat	Vuorokausimarkkinat	Päivänsisäiset markkinat	Säätösähkömarkkinat	Toimitus	Taseselvitys	
Kaupankäynti			Reservimarkkinat			
10 vuotta-päivä eteenpäin	Huutokauppa: Huominen	Jatkuva kaupankäynti: Huominen ja kuluva päivä	Reaaliaika			Toimituksen jälkeen
Tuotteet						
Futuurit, DS futuurit, optiot Vuosi, 3kk, kk ja viikko	Tunti	Tunti	1-60 min		Tasesähkö	

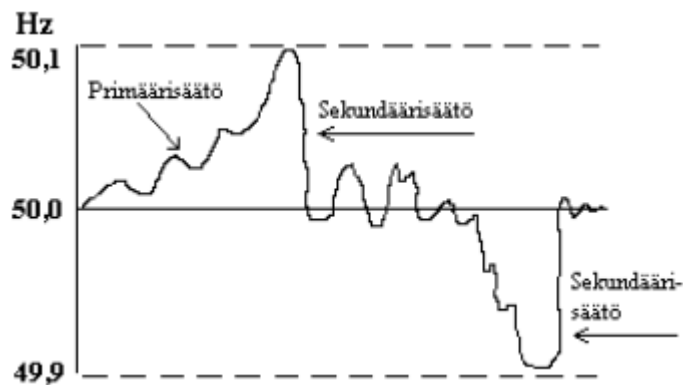
Kuva 16. Sähkön eri markkinapaikat aikajärjestyksessä vasemmalta oikealle. [56]

3.2 Tasehallinta ja sen haasteet

Pohjoismaisesta tasehallinnasta vastaavat kantaverkonhaltijat eli Suomen tapauksessa Fingrid. Aikaisemmin pohjoismainen tasehallinta hoidettiin keskitetysti Ruotsin ja Norjan kantaverkonhaltijoiden toimesta, mutta nykyinen ACE-malli (Area Control Error) otettiin

käyttöön vuonna 2021. ACE-mallissa kaikki kantaverkonhaltijat laskevat oman tasapainotustarpeensa, jonka jälkeen säätötarpeet toimitetaan yhteisille säätösähkömarkkinoille, josta ne netotuksen jälkeen aktivoidaan edullisimmasta lähtien (lisää kappaleessa 3.6). Tasehallinnan tarkoituksena on ylläpitää sähköjärjestelmän tehotasapainoa sekä sitä kautta taajuutta. Tehotasapainon varmistamiseksi tehtäviä toimenpiteitä kutsutaan tasehallinnaksi. Lisäksi tasehallinnan avulla kyetään selvittämään kaikkien markkinaosapuolien eli tuottajien, myyjien ja asiakkaiden sähkön käyttö jokaisena tuntina. Lisää taseselvityksestä kappaleessa 3.7. [53][57]

Sähköä ei pystytä suurella mittakaavalla varastoimaan, joten sähkön tuotannon ja kulutuksen tulee olla joka hetkellä tasapainossa. Jos järjestelmässä on tuotantoa enemmän kuin kulutusta, nousee sähköjärjestelmän taajuus ja jos kulutusta on enemmän kuin tuotantoa, lähtee taajuus laskemaan. Normaali sähköjärjestelmän taajuus on 50 Hz ja taajuuden normaali vaihteluväli 49,9–50,1 Hz. Taajuuden säätöä hoidetaan automaattisilla primäärisäädöillä sekä manuaalisilla sekundäärisäädöillä. Havainnekuva primääri- ja sekundäärisäädöistä kuvassa 17.

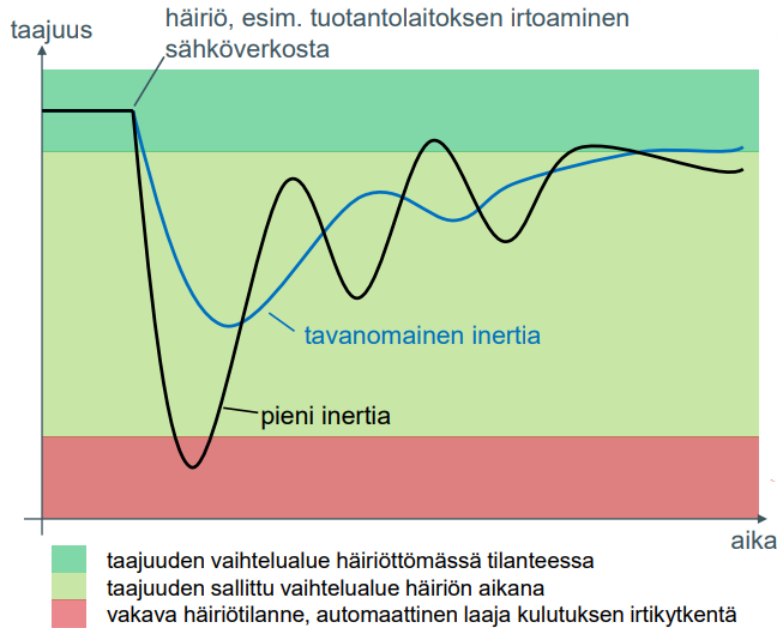


Kuva 17. Tasehallinnan primääri- ja sekundäärisäädön havainnekuva. [53]

Energiamurros ja vihreä siirtymä eli siirtyminen fossiilisista energiantuotantomuodoista uusiutuviin on lisännyt tasehallinnan merkitystä Pohjoismaissa. Uusiutuvien säätä riippuvaisten sähkön tuotantomuotojen lisääntyessä tasehallinta muuttunut myös aiempaa haastavammaksi, sillä säätä ei voi koskaan ennustaa tarkasti. Sääolosuhteet voivat vaihtua tunnin sisällä merkittävästi esimerkiksi pilvipeitteen muodostumisen tai tuulen tyyntymisen seurauksena. Fossiilisten energiantuotantolaitosten tehon tuotanto on helpommin säädettävissä ja ennustettavissa, kuin tuuli- tai aurinkoenergialaitoksissa.

Tuuli- ja aurinkoenergialaitokset liittyvät sähköverkkoon invertterien välityksellä, minkä takia verkkoon ei muodostu suuren pyörivän massan muodostamaa inertiaa. Perinteisillä voimalaitoksilla sähkö tuotetaan massiivisen suuren pyörivän generaattorin avulla, jonka liike-energia on suoraan yhteydessä sähköverkkoon. Mitä enemmän sähköverkossa on

pyörivää massaa ja sen myötä liike-energiaa, sitä enemmän inertiaa on vastustamassa taajuuden muutoksia. Inertia määrä sähköverkosta pienenee myös tilanteissa, jossa sähkö tuodaan paljon muista pohjoismaista tasasähköyhteyden avulla. [2][6] Havainnekuva inertian vaikutuksesta tuotannon äkkinäisen vähenemisen seurauksena esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Havainnekuva pienen inertian tilanteesta. [58]

Tasehallinnan helpottamiseksi Suomessa siirryttiin ns. varttitaseeseen eli 15 minuutin taseselvitysjaksoon 22.5.2023. Varttitaseen myötä Suomessa ja koko Euroopassa siirrytään lähemmäksi reaaliaikaisempia ja yhtenäisempiä sähkömarkkinoita. Siirtyminen tapahtuu vaiheittain ja se vaikuttaa laajasti taseselvitykseen, energiamittaukseen ja sähkön kaupankäyntiin. Varttitaseen tarkoituksena on vastata energiamurrokseen ja helpottaa tunnin sisäistä tasehallintaa. Taseselvityksestä lisää kappaleessa 3.7. [59]

3.3 Sähkön johdannaismarkkinat

Sähkөрssin johdannaismarkkinoilla kauppaa käydään erilaisilla sähkön hintaan liittyvillä finanssijohdannaisilla, joihin ei sisälly laisinkaan sähkön fyysistä luovuttamista. Johdannaismarkkinoilla voidaan käydä kauppaa jopa vuosien päähän nykyhetkestä Nasdaqin ylläpitämällä Commodities -finanssimarkkinapaikalla. Finanssijohdannaisilla käyty kauppa toteutetaan nettoarvon tilityksenä eli ainoastaan rahaa vaihdetaan osapuolten välillä. Kysyntä johdannaistuotteille muodostuu eri markkinatoimijoiden halusta pienentää omaa riskiään sähkön hinnan muutoksille. Sähkön tuottajat, käyttäjät ja myyjät voivat kaikki osallistua johdannaismarkkinoille itseään parhaiten hyödyttävällä tavalla. Kaupan

vastapuolena toimii Nasdaq Commodities -finanssipörssi, jolloin vastapuoliriskiä ei muodostu ja anonyymiys säilyy. Nasdaq vaatii osapuolilta aina vakuudet ja toimii selvitystalon kaupoille. Kaupankäynti johdannaisilla on jatkuva-aikaista ja markkinoilla toimii paljon myös spekulatiivisia toimijoita, joilla ei ole omaa sähkön tuotantoa tai kulutusta. [53][56]

Sähkön johdannaismarkkinoilla kauppaa käydään futuureilla, DS-futuureilla, optioilla ja aluehintatuotteilla. Futuurit ovat sopimuksia ostaa tai myydä tietty hyödyke tai tiettyä hyödykettä ehtojen mukaisesti tulevaisuudessa. Sähköfutuurisopimuksella sopimuksen osapuolet sopivat haluamansa sopimushinnan ja nettoarvon tilitys tapahtuu toteutuvan systeemihinnan ja futuurilla sovitun hinnan erotuksena. Esimerkiksi sähkön tuottaja voi futuureilla lyödä lukkoon tietyn hinnan tulevalle vuosineljännekselle ennakoon, jolloin hänen ei tarvitse kantaa riskiä laskevasta sähkön hinnasta, ja sähkön ostaja pystyy samalla futuurilla suojautumaan sähkön hinnan nousulta. [53][56]

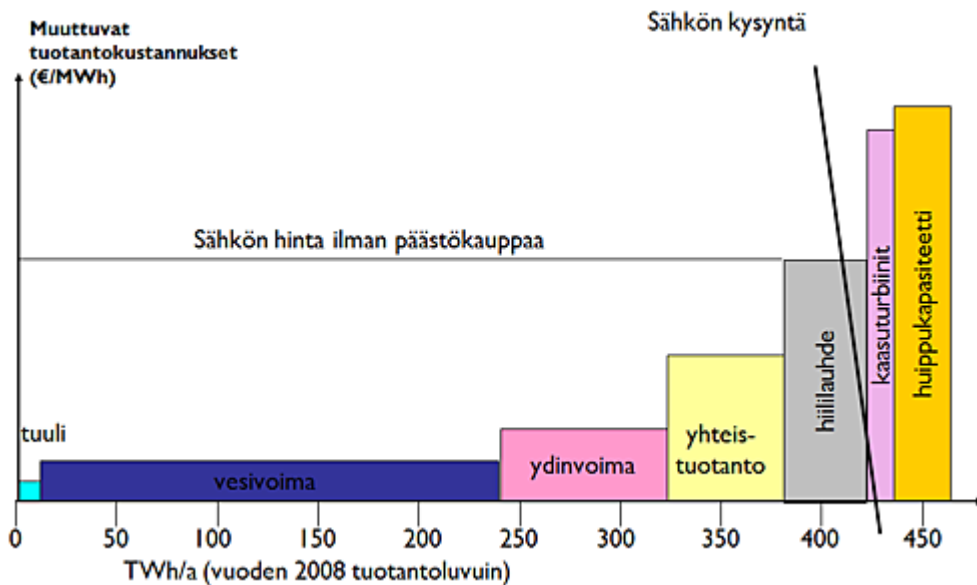
Optioilla tarkoitetaan sopimusta tulevaisuudessa tehtävästä kaupasta, mutta sopimus velvoittaa ainoastaan option myyjää. Osto- tai myyntioption ostaja maksaa myyjälle preemion korvaukseksi mahdollisuudesta päättää myöhemmin haluaako hän ostaa tai myydä sähköä ennalta sovittuun hintaan. Optioilla sähkön myyjä pystyy rajaamaan minimihinnan tuottamansa sähkön hinnalle ilman, että menettää mahdollisuuden myydä sähköä sovittua kovemmallalla hinnalla preemio vähennettynä. Vastaavasti sähkön ostaja pystyy rajaamaan hinnalle ylärajan preemio sisällettynä, ilman että menettää mahdollisuuden ostaa markkinoilta edullisempaa sähköä. [53][56]

3.4 Vuorokausimarkkinat

Sähkön vuorokausimarkkinoilla (Day-Ahead trading) käydään kauppaa joka päivä seuraavan vuorokauden jokaisesta tunnista. Eri markkinatoimijat ennustavat seuraavan päivän kulutustaan tai tuotantoaan ja tekevät sen pohjalta tarjouksen sähköpörssin suljettua huutokauppaa varten, joka sulkeutuu toimitusta edeltävänä päivänä klo 13 Suomen aikaa. Vuorokausimarkkinoilla määritetään sähkön hinta aina seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille eri markkinaosapuolien toimittamien osto- ja myyntitarjousten perusteella. Tarjousten perusteella rakentuu aluekohtaiset kysyntä- ja tarjontakäyrät, joiden risteyskohdasta muodostuu sähkön tukkumarkkinahinta kyseiselle tunnille. Suomi muodostaa oman tarjousalueensa eurooppalaisella sähkömarkkinalla. Kaikille alueille muodostuu sama systeemihinta, mikäli eri tarjousalueiden välillä oleva siirtokapasiteetti on riittävä. Jos siirtokapasiteetti on liian vähäistä, muodostuu eri alueiden välille erilaisia

aluehintoja alueiden ali- tai ylituotannon mukaan. Ylituotantoalueella sähkön hinta laskee systeemihintaan nähden ja alituotantoalueella hinta nousee. [53][56]

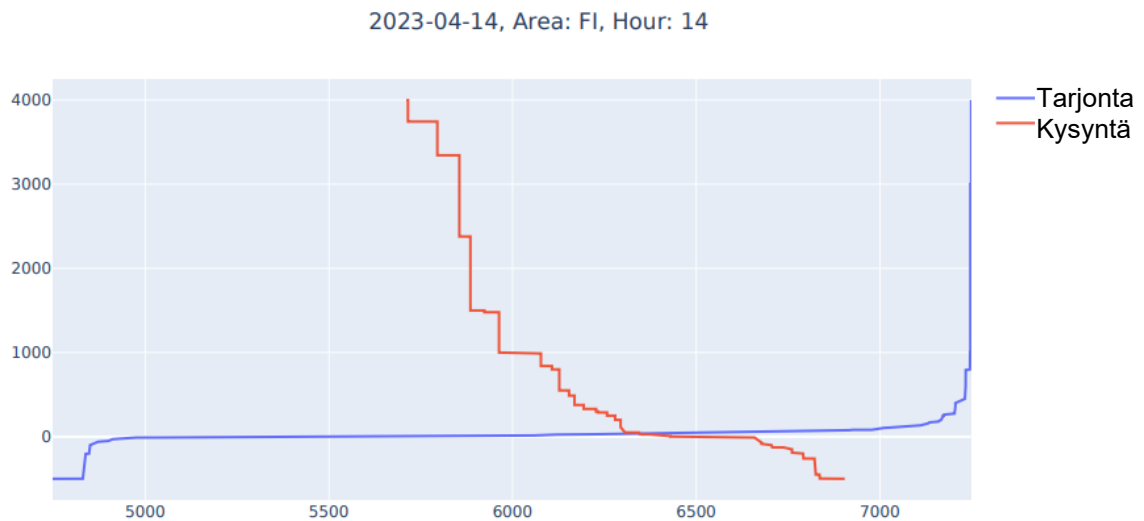
Kaikki hyväksytyyn tuotantotarjouksen tehneet tuottajat saavat tuottamastaan sähköstä saman hinnan sähkön tuotantokustannuksista huolimatta. Tämä marginaalihinnoittelu suosii polttoaineettomia ja päästöttömiä tuotantomuotoja. Käytännössä muodostuva tukumarkkinahinta vastaa kalleimman sinä tuntina tarvittavan tuotantomuodon muuttuvia kustannuksia. Jos sähkön kulutusta ei ole paljoa, ei sähköä ole järkevää tuottaa tuotantomuodoilla, joiden muuttuvat kustannukset ovat suhteellisesti korkeat. Toisaalta ydinvoimalaa ei ole järkevä ajaa alas, vaikka sähkön hinta hetkellisesti painuisikin erittäin alhaiseksi suurien alasajon kustannusten takia. Tuuli-, aurinko- ja vesivoiman tuotannosta ei käytännössä aiheudu muuttuvia kustannuksia laisinkaan, mutta esimerkiksi vesivoimaa on usein helpompi säätää alaspäin verrattuna ydinvoimaan. Sähkön tuotannon ajojärjestys muodostuu näistä muuttuvista kustannuksista ja mitä enemmän sähköntuotantoa tarvitaan, sitä kalliimmaksi tuotanto muodostuu. Suuntaa antava kuva vuoden 2008 tuotantokustannuksista ja eri energiamuotojen käyttöönottojärjestyksestä on esitetty kuvassa 19. [53][56]



Kuva 19. Sähkön markkinahinnan muodostuminen ja tuotantomuotojen käyttöönottojärjestys. [60]

Reaalimaailman kysyntä- ja tarjontakäyrät on esitetty alla olevassa kuvassa 20. Kuvaa katsoessa on hyvä huomioida myös se, että Olkiluoto 3 on tuotannossa (1590 MW), tuulivoiman tuotanto on kyseisenä päivänä kohtalaista (n. 2 000 MW), aurinkoenergiaa tuotetaan hyvin (n. 500 MW) ja Suomi on kokonaisuutena sähkön netto viejä (+ 750 MW) [61]. Suuren päästöttömien energiamuotojen tuotannon takia tarjontakäyrä on normaalia

loivempi kulutuksen kohdilta. Suomessa peruskulutuksen kysyntäjousto on hyvin maltillista, sillä kuluttajat käyttävät sähköä hinnasta riippumatta. Tähän vaikuttaa kiinteähintaiset sähkösopimukset, puutteellinen tietotaito sähkön hinnan seurannasta ja vanhat kulutustottumukset, joista ei olla valmiita luopumaan. Kuvaajasta huomataan myös, että selkeä kysyntäjousto kulutuksen puolelta tapahtuu vasta erittäin korkeilla sähkön hinnoilla ja kuinka sähkön hinta nousee lähes pystysuoraan tuotannon käydessä vähiin. Kuvaajan vasemmassa laidassa on sähkön hinta muodossa €/MWh ja alareunassa sähkön kulutus muodossa MW. Kyseisellä tunnilla sähkön tukkuhinta on 35,14 €/MWh [61].



Kuva 20. Sähkön kysyntä- ja tarjontakäyrät Suomessa 14.4.2023 klo 14. [62]


3.5 Päivänsisäiset markkinat

Päivänsisäiset markkinat (Intraday trading) aukeavat vuorokausimarkkinoiden sulkeutumisen jälkeen, eli toimitusta edeltävänä päivänä klo 13 ja toimivat jälkimarkkinapaikkana vuorokausimarkkinoille. Tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi pelkkä vuorokausimarkkina ei riitä tarkkuudeltaan, sillä sekä kulutus että tuotanto voi muuttua edellisen vuorokauden ennusteesta. Lopulliseen tuotanto- tai kulutussuunnitelmaan voi vaikuttaa esimerkiksi siirtolinjan vaurioituminen, säätilanne, vikaantunut laite tai tuotannon rajoitukset. Suomen päivänsisäisillä markkinoilla markkinatoimijat saavat mahdollisuuden korjata tuotanto- ja kulutussuunnitelmiaan aina toimitustuntiin asti. Viron rajalla markkina sulkeutuu 30 minuuttia ennen toimitustuntia ja Ruotsin rajalla 60 minuuttia ennen toimitustuntia. Markkinat toimivat jatkuvan kaupankäynnin periaatteella vuoden jokaisena tunnina. [53][56]

3.6 Säättösähkö- ja reservimarkkinat

Sähköjärjestelmän tehotasapainon poikkeamaa toimitustunnin sisällä käsitellään tasehallinnan avulla tasesähköinä. Säättösähkö- ja reservimarkkinat jaetaan nimensä mukaisesti säättösähkö- ja reservimarkkinoihin, mutta pelkästä reservimarkkinoista puhuttaessa voidaan tarkoittaa yleensä myös säättösähkömarkkinoita. Säättösähkö- ja reservimarkkinoita käytetään tasehallinnan työkaluina sähköjärjestelmän taajuuden ylläpidossa. [63]

Edellä olleissa kappaleissa kerrottiin kuinka markkinatoimijat pyrkivät ennustamaan mahdollisimman tarkasti kyseisen tunnin kulutusta tai tuotantoa tehotasapainon saavuttamiseksi, mutta käytännössä ennusteet eivät toteudu juuri koskaan sellaisinaan. Ennusteista poikkeamiset voivat johtua esimerkiksi sääolosuhteiden muutoksista, tuotanto- tai kulutuslaitteistojen toimimattomuudesta, kuluttajien käyttäytymisestä tai mistä tahansa muustakin syystä. Tasehallinnan päätehtävä on varmistaa jatkuva tehotasapaino sähköjärjestelmässä, vaikka ennustetuista tuotanto- tai kulutusennusteista poikettaisiinkin. Tasehallintaa tehdään Fingridin ylläpitämällä säättösähkö- ja reservimarkkinoilla. Sähkömarkkinoilla on aina kaikkien toimijoiden edun mukaista ennustaa sähkön käyttö mahdollisimman tarkasti, jotta kalliimpia tase- ja säättösähkökauppoja ei tarvittaisi. [53][56] Taseselvityksestä lisää kappaleessa 3.7. Suomessa käytössä olevat reservituotteet on esitetty kuvassa 21 reagointinopeusjärjestyksessä vasemmalta oikealle.

	FFR	FRD	FCRN	aFRR	MFR
	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	Säättösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoittava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, hankitaan pienen inertian tilanteissa	Suuremmissa taajuuspoikkeamissa, erikseen ylösäättö ja alassäättö	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Kolmessa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa (12,5 min)
					

Kuva 21. Sähkön reservituotteet Suomessa. [64]

Reservien ylläpidosta aiheutuneet kustannukset katetaan kantaverkkotariffilla ja tasepalvelussa kerättävin maksuin. Säättösähkömarkkinoiden kustannukset katetaan tasesähkökaupalla. [63]

3.6.1 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat

Tasehallinnalla tarkoitetaan tehotasapainon eli tuotannon ja kulutuksen välisen tasapainon ylläpitoa, jota varten hankitaan säätosähköä säätosähkömarkkinoilta. Fingrid ylläpitää säätosähkömarkkinoita yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Säätosähkömarkkinoista Suomessa puhuttaessa tarkoitetaan manuaalista taajuuden palautusreserviä eli mFRR (manual Frequency Restoration Reserves) markkinaa, joka jakautuu sekä alas- että ylössäätöön. Säätosähkömarkkinoille voi jättää ja päivittää tarjouksia 45 minuuttia ennen käyttötuntia asti ja tarjoukset jätetään erikseen ylös- ja alassäätöön. Kaikki pohjoismaiset säätosähkötarjoukset aktivoidaan hintajärjestyksessä, kunhan maakohtaiset tekniset reunaehdot täyttyvät. Tekniset reunaehdot liittyvät muun muassa siihen, että taajuus täytyy pystyä ylläpitämään myös saarekekäyttötilanteissa. [63]

Fingrid on valtakunnallisessa tasevastuussa sähköjärjestelmän taajuuden ylläpitämisessä ja Fingridillä on velvoite varmistaa, että sillä on tarpeeksi säätökykyistä kapasiteettia sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi. Fingridin velvoite vuonna 2023 pohjoismaisilla säätosähkömarkkinoilla on taajuuden ylössäätöön on 880–1300 MW ja alassäätöön 150 MW säätökapasiteettia. Velvoitteiden varmistamiseksi Fingridillä on omia sekä pitkäaikaisilla käyttöoikeussopimuksilla hankittuja varavoimallaitoksia. Varavoimallaitoksilla varmistetaan, että käytössä on riittävästi taajuuden palautusreserviä. Varavoimallaitokset käynnistetään vasta siinä vaiheessa, kun säätosähkömarkkinoilta on kaikki muut tarjoukset jo tilattu, eikä varavoimallaitoksia voida käyttää muuhun kaupalliseen sähköntuotantoon. Vuodelle 2023 Fingridillä on käytössä varavoimallaitoksia 1205 MW edestä. [56][63][64]

Säätökapasiteettimarkkinoilla tarkoitetaan markkinaa, jolla Fingrid varmistaa toimivat säätosähkömarkkinat. Reservitoimittaja osallistuessaan säätökapasiteettimarkkinoille on veloitettu jättämään sopimuksen mukaisesti säätötarjouksia säätosähkömarkkinoille. Säätosähkön tarjoaja voi siis saada korvauksen tarjoamastaan kapasiteetista, vaikka säätosähkömarkkinoilta kapasiteettia ei tilattaisikaan.

3.6.2 Reservimarkkinat

Fingrid ylläpitää säätosähkömarkkinoiden (mFRR) lisäksi muita nopeampia reservimarkkinoita, joita ovat järjestyksessä nopeimmasta hitaimpaan; nopea taajuusreservi (FFR), taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja automaattinen taajuudenpalautusreservi (aFRR). Suurimmat erot eri reservien välillä löytyvät ak-

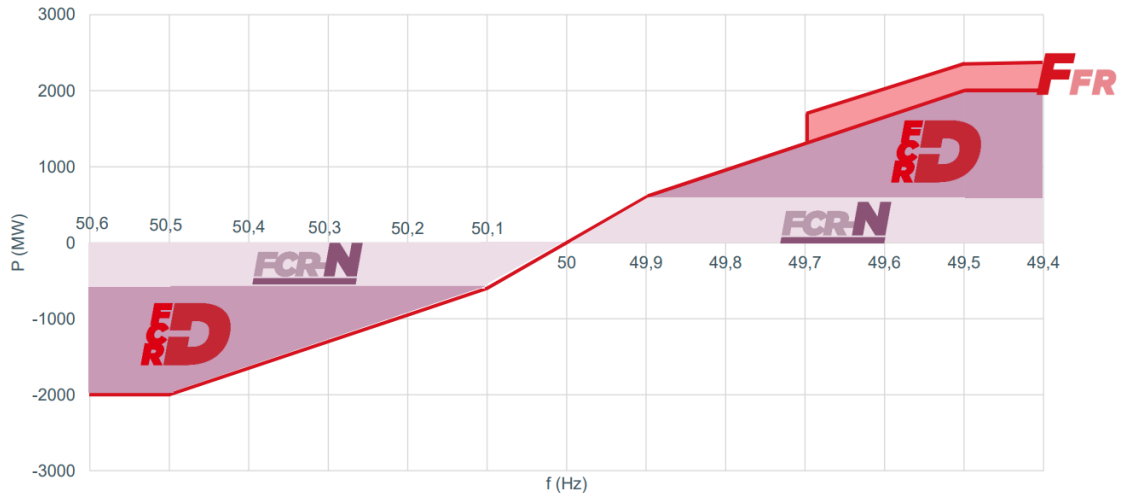
tivoitumisnopeuksista ja aktivoitumistavoista. Nopeimmissa reservilajeissa aktivoituminen tapahtuu automaattisesti oman paikallisen taajuudenmittauksen perusteella, kun hitaammassa reservilajeissa aktivoitumispyyntö tulee Fingridiltä. Eri reservilajien erot löytyvät taulukosta 4. Taulukko pitää sisällään myös säätösähkömarkkinan.

Taulukko 4 Eri reservilajien ominaisuuksia. Muokattu lähteistä [64][65][85].

Nimi	Lyhenne	Aktivoitumistiheys	Aktivointitapa	Aktivointinopeus
Nopea taajuusreservi	FFR	Ehkä vuosittain	Paikallisen taajuusmittauksen perusteella	0,7-1,3 s
Taajuusohjattu häiriöreservi	FCR-D	n. 4600 min vuodessa		5 s / 50 %, 30 s / 100 %
Taajuusohjattu käyttöreservi	FCR-N	Jatkuvasti		3 min
Automaattinen taajuuden palautusreservi	aFRR	Useita tunteja päivittäin	Fingridiltä tulevan signaalin perusteella	5 min
Säätösähkömarkkinat	mFRR	Päivittäin	Elektronisella sanomalla tai puhelimitse	15 min

Nimi	Min. tarjouskoko	Korvauksen maksuperuste	Markkinat	Vähimmäismitoitus täydellä teholla
Nopea taajuusreservi	1 MW	Kapasiteetti	Tuntimarkkinat	5 sec
Taajuusohjattu häiriöreservi			Tunti- ja vuosimarkkinat	20 min
Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1 MW	Kapasiteetti + energia	Tuntimarkkinat	30 min
Automaattinen taajuuden palautusreservi	1 MW			1 h
Säätösähkömarkkinat	5 MW / 1 MW	Energia	Tuntimarkkinat	3 h

Reservien tarkoituksena on pitää taajuus jatkuvasti halutulla tasolla. Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) pyrkii pitämään taajuuden normaalilla vaihteluvälillä (49,9–50,1 Hz) ja jos taajuus pääsee karkaamaan sen ulkopuolelle, liittyy taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) mukaan. Suurissa ja nopeissa taajuuden romahduksissa, kuten suuren voimalaitoksen tippumisesta verkosta, on nopea häiriöreservi (FFR) lisäämässä virtuaalista inertiaa verkkoon. Tarve nopealle taajuusreserville on todennäköisempää matalan inertian tilanteissa, eli lämmityskauden ulkopuolella öisin ja viikonloppuisin, kun kulutus on pienempää, eikä perinteisiä pyöriviä massoja omaavia voimalaitoksia ole niin paljon verkossa. Myös Pohjoismaisen vesivoiman tilanne vaikuttaa merkittävästi verkon inertian suuruuteen. [64][67] Näiden automaattisesti taajuuden mukaan reagoivien reservien toiminta on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Automaattisten taajuusohjattujen reservien aktivoituminen. [64]

Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) aktivoituminen perustuu Fingridiltä 10 sekunnin välein tulevaan tehonmuutossignaaliin. Pohjoismaisesta synkronialueesta lasketaan taajuuspoikkeaman perusteella tehonmuutostarve normaalitaajuuteen palautumiseksi ja jo aktivoitujen taajuusohjattujen reservien vapauttamiseksi. Tehon aktivoimissignaali on etumerkiltään negatiivinen alassäätötilanteessa ja positiivinen ylösääto-tilanteessa. Signaalin lähettämiseksi käytetään ELCOM tai ICCP tiedonvaihtoa FEN- tai KoVa-FEN verkossa. [64]

3.7 Taseselvitys

Sähkötaseiden tarkoituksena on varmistaa sähköntuotannon ja -kulutuksen välinen tehotasapaino jokaisella ajan hetkellä, sekä selvittää eri sähkömarkkinaosapuolten eli tuottajien, myyjien ja asiakkaiden sähkön käyttö jokaiselta tunnilta. Suomessa hetkellisestä tehotasapainon ylläpidosta ja valtakunnallisesta taseselvityksestä vastaa Fingrid. Kaikilla sähkömarkkinoilla toimivilla osapuolilla on oltava avoin toimittaja, joka ostaa tai myy tarvittavan määrän sähköä osapuolelta ja tasapainottaa sähkötasetta. Avoimella toimittajalla on velvollisuus toimittaa sen asiakkaille niin paljon sähköä kuin ne tarvitsevat eli sähkön ei pitäisi missään tilanteessa ”loppua kesken” sähkön kuluttajalla. Usein avoimena toimittajana toimii sähköyhtiö, joka ostaa sähkön tuottajalta ja myy sitä kuluttajille. Tasevastaava sähköyhtiö pyrkii ennustamaan etukäteen sen asiakkaiden tarvitsevan sähkön määrä ja hankkimaan vastaavan määrän sähköä sähkön tuottajilta tai muualta sähkömarkkinoilta. Vaikka sähkömarkkinoilla voi käydä kauppaa aivan sähkön toimitukseen asti, voi tasevastaavan hankinta ja myynti poiketa toisistaan, jolloin tasevastaavalle syntyy tasepoikkeamaa. Tasevastaavana toimivan sähköyhtiön avoimena toimittajana toimii puolestaan Fingrid, joka loppupelissä vastaa sähkötaseen tasapainosta ja tasapainottaa tasevastaavien tasepoikkeamat reservimarkkinoiden avulla. Tasevastaavien on

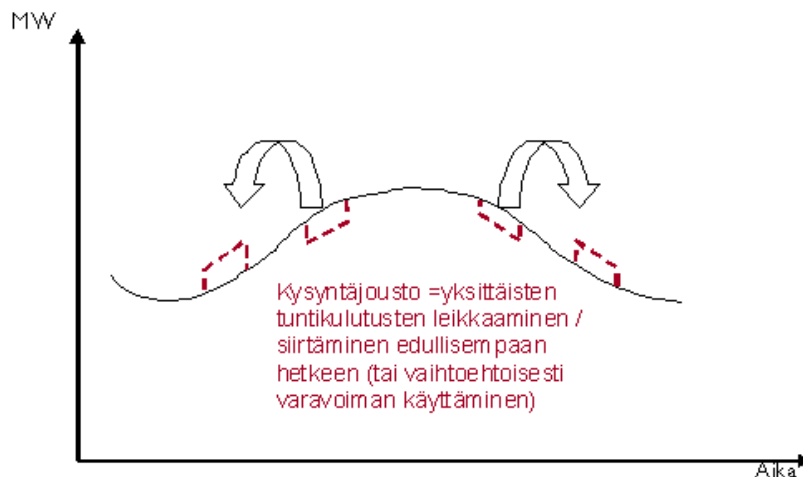
kannattavaa pyrkiä minimoimaan tasepoikkeama mahdollisimman hyvin, sillä tasevastaavat joutuvat maksamaan Fingridille tasepoikkeamasta volyyminmaksun jokaista Fingridin tasevastaavalle myymää tai tältä ostamaa megawattituntia kohden. [68]

Taseselvitysjakso on ollut tunnin mittainen, mutta 22.5.2023 alkaen on siirrytty 15 min taseselvitysjaksoon. Siirtymäajalla tasepoikkeaman hinta määräytyy kuitenkin niin, että se on tunnin jokaisena 15 min jaksolla sama. Viidentoista minuutin hinnoitteluun siirytään sen jälkeen, kun säätösähkön hinta määräytyy 15 minuutin perusteella. [68]

Tasepoikkeamasta maksetaan Fingridille korvausta poikkeavuuden aikaan voimassa olevan ylös- tai alassäätöhinnan mukaan. Jos ajanjaksolla ei ole tehty säätöjä, käytetään tasepoikkeaman hinnoittelussa Suomen aluehintaa vuorokausimarkkinoilla. Tasepalveluun liittyvät kustannukset pyritään kohdistamaan aiheuttamisperusteisesti ja tasepalvelutariffilla ylläpidetään taajuusohjattua käyttöreserviä (FCR-N) ja automaattista taajuuden palautusreserviä (aFRR), sekä 80 % säätökapasiteettimarkkinoista. [68]

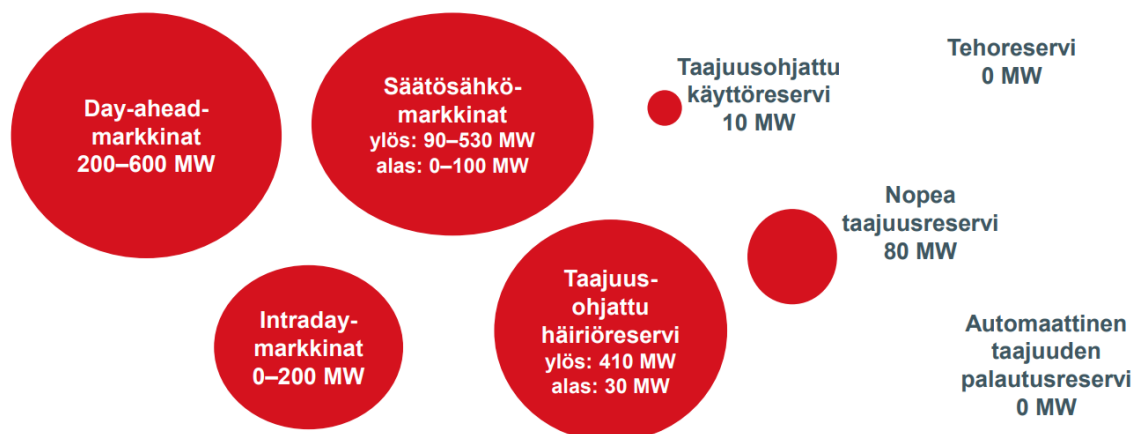
3.8 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkön käytön ajoittamista niin, että kulutusta siirtyy korkean kulutuksen hetkestä matalamman kulutuksen hetkeen tai sähkönkäytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeiden takia. Kysyntäjousto ei vähennä sähkön kokonaiskulutusta pidemmällä aikavälillä, mutta sen avulla voidaan tasapainottaa sähkön kysyntäkäyriä tasaisemmaksi siirtämällä kulutusta ajanhetkeltä toiselle. Kysyntäjouston kysyntä on kasvanut samoista syistä kuin reservimarkkinoidenkin, eli joustamattoman ja vaikeasti ennustettavan sähköntuotannon lisääntymisen takia. Suomessa sähkön kysyntä ei hirveästi jousa sähkön hinnan normaalin vaihteluvälin mukaan kuten voimme huomata kuvasta 20, mikä yhdessä vaikeasti ennustettavan uusiutuvan sähkön tuotannon kanssa aiheuttavat suuria sähkön hintapiikkejä. Yksinkertaisimmillaan kysyntäjoustolla tarkoitetaan kuluttajan lämminvesivaraajan tai sähköajoneuvon latauksen ajastamista yöaikaan tai hetkittäisen kuormituspiikin ulkopuolelle, jolloin sähkön hinta on yleensä halvempaa. Kysyntäjousto on tehokkaimpia, edullisimpia ja nopeimpia tapoja vaikuttaa sähkön hankintakustannuksiin markkinaehtoisesti. [69] Periaatekuva kysyntäjoustosta on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Kysyntäjouston periaatekuva. [69]

Suomessa suurteollisuus kuten metsä- ja metalliteollisuus ovat osallistuneet jo pitkään kysyntäjouston avulla reservimarkkinoille, mutta varsinkin nyt aggregaattoreiden myötä pienemmilläkin toimijoilla on ollut mahdollisuus osallistua markkinoille, jotka yleensä vaativat vähintään 1 MW joustokapasiteetin. Aggregoinnista lisää kappaleessa 3.9.3. Kysyntäjouston osallistuminen eri markkinapaikoille on esitetty kuvassa 24.

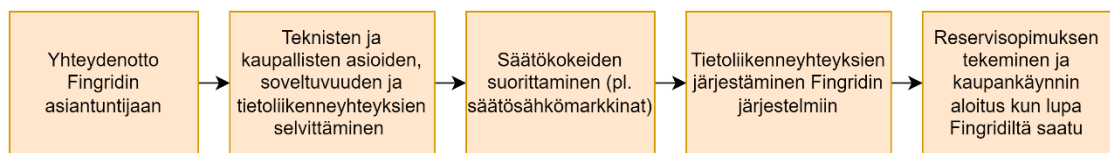


Kuva 24. Kysyntäjouston osallistuminen eri markkinapaikoille Suomessa. Tilanne 1.2.2022. [64]

3.9 Reservimarkkinoille osallistuminen

Reservimarkkinat on suunniteltu lähinnä suurille energiatoimijoille ja reservimarkkinoille osallistuminen ei ole aivan yksinkertainen prosessi varsinkaan pienelle toimijalle. Yksinkertaistettu prosessi reservimarkkinoille liittymisestä on esitetty kuvassa 25. Ensimmäisenä prosessissa ollaan yhteydessä Fingridin asiantuntijaan, jonka kanssa keskustellaan, onko reservimarkkinoille osallistuminen ylipäätään mahdollista, mille markkinoille voisi olla kyvykkyyksiä osallistua ja minkälaisia toimenpiteitä osallistumisesta esimerkiksi

tietoliikenneyhteyksien puolesta tulisi. Kun soveltuvuus ja teknistaloudelliset asiat on selvitty, sekä niihin liittyvät tarvittavat toimenpiteet on suoritettu, voidaan tehdä Fingridin vaatimat säätökokeet resursseille. Säätökokeilla todennetaan tarvittava kyvykkyys osallistua markkinoille ja varmistetaan tiedonsiirron sekä datanvaihdon toimivuus. Säätökokeet ovat reservimarkkinakohtaiset ja voimassa 5 vuotta. Kun tarvittava dokumentaatio ja onnistuneesti suoritettavat säätökokeet on tehty, järjestää Fingrid tietoliikenneyhteydet kaupankäyntialustalle ja muihin tarvittaviin järjestelmiin, joita reservimarkkinoilla toimimiseen tarvitaan. Näiden jälkeen allekirjoitetaan reservisopimus Fingridin kanssa ja aloitetaan reservitarjousten jättö markkinapaikoilla, kun Fingridiltä on annettu siihen lupa. [66]



Kuva 25. Yksinkertaistettu prosessi reservimarkkinoille liittymisestä. Muokattu lähteestä. [66]

3.9.1 Vaatimukset

Reservimarkkinoilla toimimiseksi sekä reservitoimittajan että reservikohteen täytyy täyttää Fingridin vaatimukset. Reservitoimittajalla tulee olla lupa reserviresurssin käyttöön, jos reservitoimittaja ei ole itse resurssin omistaja ja jos reservitoimittaja ei ole itse resurssin tasevastaava, tulee tasevastaava informoida reservikäytöstä. Reservitoimittajan tulee muodostaa sopimus Fingridin kanssa reservimarkkinoille osallistumisesta ja olla vastuussa reservipalvelun toteutuksesta Fingridin suuntaan, vaikka olisikin ulkoistanut toimintoja ulkopuoliselle palveluntarjoajalle.

Reservitoimittajan vaatimusten lisäksi on reservikohteen täytettävät reservimarkkinoiden vaatimukset ja edellytykset. Saman reservitoimittajan reserviresursseja voi aggregoida siten, että aggregoidut resurssit muodostavat yhdessä kokonaisuuden, joka täyttää reservimarkkinan tekniset vaatimukset vaikkei yksittäiset resurssit niitä täyttäisikään. Eri tasevastaavien taseista on mahdollista aggregoida resursseja nopeassa taajuusreservissä (FFR) ja taajuusohjatussa häiriöreservissä (FCR-D). Taajuusohjatussa käyttöreservissä (FCR-N) ja automaattisessa taajuuden palautusreservissä (aFRR) on mahdollista aggregoida resursseja, kunhan tasevastaavittain tarjottavan reservin määrä ylittää reservin minimi tarjouskoon. Manuaalisessa taajuuden palautusreservissä (mFRR) eri tasevastaavien taseista aggregointi ei ole sallittua (pl. osuusvoimalaitokset). Reservikoh-

teiden tulee olla suoraan kytkettävissä Suomen sähköverkkoon. Kaikkien reservikohteiden (pl. säätösähkömarkkinoiden) säätöominaisuudet tulee olla testattuna Fingridin säätökokeilla ennen reservimarkkinoille osallistumista. [66]

Reservimarkkinoille osallistuminen vaatii lisäksi oikeanlaista todennettua tiedonvaihtoa reservitoimittajan ja Fingridin välillä. Tarvittavat tiedonvaihdon vaatimukset vaihtelevat hieman reservimarkkinan mukaan. Pääasiallinen tiedonvaihtoalusta reservikaupankäynnille on VAKSI-järjestelmä, joka on internetpohjainen sovellus, jonne hyväksytyt reservitoimittaja voi jättää reservitarjouksia eri markkinapaikoille. VAKSI:in tallennetaan myös kaikki hyväksytyt kaupat ja siellä voidaan hyväksyä säätösähkömarkkinoilla pyydettyjä aktivointeja. Reaaliaikainen tiedonsiirto Fingridin ja reservitoimittajan välillä toteutetaan FEN-verkossa (ELCOM- tai ICCP-protokolla) tai web-tiedonsiirrolla (IEC 60870-5-104-protokolla). Muita tiedonvaihtovälineitä ovat ECP (Energy Communication Platform) ja EDI-sanomaliikenne. [63][65]

Reaaliaikasisignaalit lähetetään Fingridille pääsääntöisesti 60 sekunnin päivityssyklissä, mutta aFRR reservissä päivityssykli on kymmenen sekuntia. Reservikohteiden historia-tiedot tallennetaan FCR ja FFR reserveistä. FCR reservien tapauksessa talletusväli on 1 s ja FFR reservissä 0,1 s. Eri reservilajien signaalilistat ja kerättävät historiatiedot on esitetty liitteissä A ja B. [65]

Lisäksi reservikohtaiset vaatimukset eroavat toisistaan aktivointisignaalin, aktivointinopeuden, aktivointitarkkuuden, minimitarjoukseen ja korvausmallien osalta. Eroja on esitetty jo aikaisemmissa kuvassa 21 ja kuvassa 22 ja kohdassa 3.6.2.

Nopean taajuusreservin (FFR) aktivointi perustuu taajuuden laskuun reagoimiseen. Taajuus voidaan mitata mistä tahansa reservin tarjoajan valitsemasta pisteestä Suomen sähköjärjestelmästä (pl. Ahvenanmaa). Mittauksen tarkkuus on oltava vähintään 10 mHz ja näytteenottoväli 0,1 sekuntia. Markkinalla on kolme erilaista aktivointikynnystä, joihin reservin täytyy täysimääräisesti ehtiä aktivointiaikaan mennessä. Näistä vaihtoehdoista reservitoimittaja valitsee yhden. Reservin teho ei saa laskea aktivoinnin aikana, eikä se saa ylittää hyväksyttyä kapasiteettia yli 20 %:lla. Vaihtoehdotasot aktivointiin on esitetty taulukossa 5. Minimitarjouskoko markkinoille on 1 MW ja aggregointi on mahdollista myös eri tasevastuun reserviresursseilla.

Taulukko 5 Nopean taajuusreservin aktivointitaajuudet sekä -ajat. [63]

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

Nopea taajuusreservi (FFR) on tarkoitettu inertian korvaamiseksi, minkä takia sen kesto on lyhyt muihin reservituotteisiin nähden. Vähimmäiskesto riippuu deaktivoinnin nopeudesta. Jos deaktivointia ei rajoiteta laisinkaan, on reservin oltava aktiivinen tarjotulla kapasiteetillä vähintään 30 sekunnin ajan, mutta deaktivoinnin tapahtuessa enintään 20 % vauhdilla sekunnissa kapasiteettiin nähden, riittää 5 s vähimmäiskesto täydelle kapasiteetille. Reservikohteella on aktivoitumisen jälkeen mahdollisuus palautua eli esimerkiksi ladata akkuja tai kiihdyttää nimelliseen pyörimisnopeuteen korkeintaan 25 % teholla reservikohteen kapasiteetista. Palautuminen voi alkaa heti vähimmäiskeston jälkeen, jos vähimmäiskesto on ollut 30 sekuntia tai 15 sekuntia aktivoinnin päättymisestä, jos vähimmäiskesto on ollut 5 sekuntia. Nopean taajuusreservin on oltava valmis uuteen aktivointiin viimeistään 15 minuutin kuluttua edellisestä aktivoinnista. Nopean taajuusreservin aktivoivia taajuuden pudotuksia tulee vuositasolla yksittäisiä ja niiden kesto on keskimäärin muutamien sekuntien luokkaa.

FFR-tarjouksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- Aika: päivämäärä ja tunti (tunnin alkuaika, EET)
- Määrä (MW): tarjouksen määrä 100 kW:n tarkkuudella, tarjouksen vähimmäiskapasiteetti 1 MW
- Tyyppi: Aggregoitu, Kulutus, Tuotanto

Yhdistelmätarjouksen tulee yllä mainittujen tietojen lisäksi sisältää seuraavat tiedot:

- yhdistelmä: FFR + FCR-D ylös tuntimarkkina tai FFR + FCR-D ylös reservisuunnitelma
- Sääötapa: Lineaarinen, Yksi porras
- kapasiteetin hinta (€/MW,h), erikseen FFR ja FCR-D ylös

Tarjouksia voi jättää käyttötuntia edeltävälle vuorokaudelle klo 18:00 (EET/EEST) asti. Tarjoukset jätetään Fingridin Vaksi -järjestelmään *Fingridin reservikaupankäynti ja tiedonvaihto* -ohjeen mukaisesti. Fingrid hyväksyy tarvitsevansa määrän tarjouksia hintaperusteisesti ja hyväksyy kaupat klo 22:00 mennessä edellisenä vuorokautena. [63][65][70][71]

Taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) tulee aloittaa säätäminen, kun taajuus poistuu normaalilta vaihteluväliltään (49,9–50,1 Hz) ja aktivoitun kapasiteetin tulee olla verrannollinen taajuuspoikkeaman suuruuteen niin, että 100 % tarjotusta kapasiteetista on käytössä taajuuden laskiessa 49,5 Hz tai noustessa 50,5 Hz asti. Vähintään 50 % tarjotusta häiriöreservistä tulee olla aktivoituneena 5 sekunnissa ja 100 % kapasiteetista 30 sekunnissa 0,5 Hz askelmaisen taajuusmuutoksen seurauksena. Minimitarjouskoko markkinoille on 1 MW ja aggregointi on mahdollista myös eri tasevastuun reserviresursseilla. Vuosittain taajuus poistuu normaalin vaihteluvälin ala- ja yläpuolelle n. 1 % ajasta ja keskimääräiset häiriötilanteen kestot ovat kymmenen sekunnin paikkeilla.

Säätötarjouksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- Aika: päivämäärä ja tunti (tunnin alkuaika, EET)
- Määrä (MW): tarjouksen määrä 100 kW:n tarkkuudella
- teho (MW), erikseen ylös- ja alassäätötarjoukset
- hinta (€/MWh), erikseen ylös- ja alassäätötarjoukselle

Lisäksi tarjous voi sisältää seuraavat vapaaehtoiset tiedot:

- tyyppi: (kulutus, tuotanto, aggregoitu)

Tarjouksia voi jättää käyttötuntia edeltävälle vuorokaudelle klo 18:30 (EET/EEST) asti. Tarjoukset jätetään Fingridin Vaksi -järjestelmään *Fingridin reservikaupankäynti ja tiedonvaihto* -ohjeen mukaisesti. Fingrid hyväksyy tarvitsevansa määrän tarjouksia hintaperusteisesti ja hyväksyy kaupat klo 22:00 mennessä edellisenä vuorokautena. [65][85][71][72][73]

Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tulee pystyä säätämään tehoa jatkuvasti normaalin taajuudenvaihteluvälin sisällä (49,9–50,1 Hz) niin, että taajuudensäädön kuollut alue saa olla korkeintaan $50 \pm 0,01$ Hz. Kuolleen alueen ulkopuolella aktivoituvan kapasiteetin tulee olla verrannollinen taajuuspoikkeaman suuruuteen niin, että taajuusalueen rajoilla on 100 % tarjotusta kapasiteetista käytössä. Täysi kapasiteetti tulee olla käytössä kolmessa minuutissa. Minimitarjouskoko on 0,1 MW ja reservikohteen tulee kyetä sekä tehonlisäykseen että tehonpudotukseen. Aggregointi on sallittua saman tasevastuun sisällä.

Säätötarjouksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- Aika: päivämäärä ja tunti (tunnin alkuaika, EET)
- Kapasiteetti (MW): tarjouksen määrä 100 kW:n tarkkuudella
- hinta (€/MW,h)

Tarjouksia voi jättää käyttötuntia edeltävälle vuorokaudelle klo 18:30 (EET/EEST) asti. Tarjoukset jätetään Fingridin Vaksi -järjestelmään *Fingridin reservikaupankäynti ja tiedonvaihto* -ohjeen mukaisesti. Fingrid hyväksyy tarvitsevansa määrän tarjouksia hintaperusteisesti ja hyväksyy kaupat klo 22:00 mennessä edellisenä vuorokautena. [64][65][72][73]

Automaattisella taajuuden palautusreservillä (aFRR) tarkoitetaan reserviä, jonka tarkoituksena on palauttaa nopeammin aktivoituneet reservit takaisin normaaliin tilaansa. Nopeammin reagoivien reservien aktivointiajat ovat lyhyempiä, kun taas palautusreserveillä reservin aktivoituessa säätöaika on usein huomattavasti pidempi. Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivointi perustuu Fingridiltä 10 sekunnin välein tulevaan tehonsäätösignaaliin. Aktivointinopeuden vaatimuksena on säädön aloitus 30 sekunnissa aktivointisignaalin lähetyksestä ja täysi aktivointi 5 minuutin kuluessa. Aktivoidun reservin määrä tulee olla 90–110 % tehopyynnöstä ja minimikesto aktivointikyvyllä on 1 h. Fingrid seuraa reservin ylläpitoa ja aktivoitumista reaaliaikatietojen perusteella. Reaaliaikatietoihin sisältyy aFRR -markkinalle myyty kapasiteetti, hetkellinen pätöteho, sekä aktivointisignaalin takaisinlähetykset. Reaaliaikaisen tiedonsiirron päivityssykli on 10 s ja se tapahtuu ainoastaan analogisesti FEN- tai KoVa-FEN verkossa. [63][64]

Reservitoimittajan ei tarvitse olla reserviresurssin omistaja, avoin toimittaja tai tasevastaava osallistuakseen aFRR-markkinalle. Toimittajalla tulee kuitenkin olla resurssin omistajan suostumus markkinoille osallistumiseksi ja ilmoittaa reservimarkkinoille osallistumisesta tasevastaavalle viimeistään, kun sopimus Fingridin kanssa säätökäytöstä on tehty. Automaattiseen taajuuden palautusreserviin voi osallistua myös aggregoimalla eri tasevastuissa olevia reserviresursseja. Reservikohteen tulee koostua yhden tasevastuun reserviresursseista pois lukien osuusvoimalaitokset. Eri tasevastuiden reservikohteet tulee eriyttää omiin tarjouksiinsa ja niiden pitää olla vähintään tarjouksen minimikapasiteetin suuruisia. Itsenäinen aggregointi on ollut sallittua 15 min taseselvitysjaksoon siirtymisestä asti (22.5.2023), mutta ehdot ovat kehittymässä ja kesällä 2024 voimaan tulevat uudet ehdot, joissa itsenäinen aggregointi on sallittua vain erillisillä pilottiehdoilla [74].

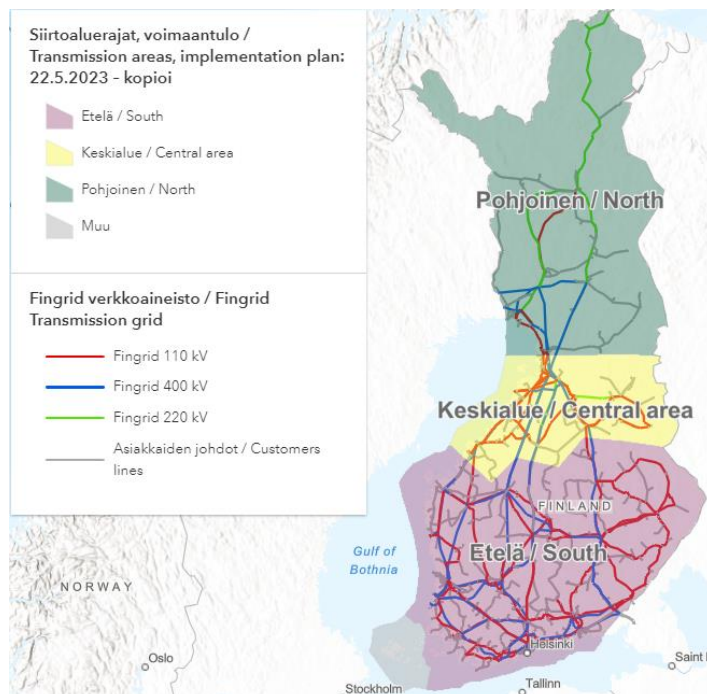
Markkinalle jätetyn tarjouksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- Aika: päivämäärä ja tunti (tunnin alkuaika, EET)
- Määrä (MW): tarjouksen määrä 1 MW:n tarkkuudella
- Hinta (€/MW,h): tarjouksen hinta euroissa
- kapasiteetti (MW) ylös ja/tai alas
- Tuotantomuoto: Vesi tai Lämpö

Tarjoukset jätetään viimeistään tarjouksen kohteena olevaa käyttötuntia edeltävänä päivänä klo 07:30 (CET/CEST) ja aikaisintaan seitsemän vuorokautta ennen käyttötuntia. Tarjoukset hyväksytään hintajärjestyksessä alas- ja ylössäätökapasiteetille erikseen. [65][75][76]

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinalla (mFRR) osallistumisen edellytyksenä on, että Fingrid pystyy reaaliaikaisesti todentamaan tehonmuutosta, kohde sijaitsee Fingridin järjestelmävastuualueella (Suomi pl. Ahvenanmaa), minimitarjouskoko on 5 MW (rajoitetusti 1 MW), minimitarjouskoon mukaiseen tehonsäätöön päästään 15 minuutin kuluessa ja säätöä voidaan toteuttaa tarjotulla teholla koko käyttötunnin ajan. Fingrid tilaa tarjoukset säätösähkömarkkinoilta manuaalisesti joko elektronisesti tai puhelinoitolla. Reserviresurssien aggregointi on sallittua, jos resurssit sijaitsevat samalla siirtoalueella* (etelä / keski / pohjoinen) ja ovat saman tasevastaavan taseessa pl. osuusvoimalaitokset. [63][64]

*Varttitaseeseen siirtymisen yhteydessä Suomessa siirryttiin säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoilla kolmeen siirtoalueeseen, kun aiemmin alueita on ollut kaksi (etelä/pohjoinen). Siirtoalueella tarkoitetaan maantieteellistä aluetta, jossa säätöresurssit sijaitsevat. Alueiden sijainti on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Säätömarkkinoiden siirtoalueajat kartalla. [63]

Säätötarjouksen tulee sisältää seuraavat tiedot:

- teho (MW), erikseen ylös- ja alassäätötarjoukset
- hinta (€/MWh), erikseen ylös- ja alassäätötarjoukselle

- Reservikohteen nimi
- tunti (EET/EEEST aikaa)
- reservitieto, jos Säättötarjous on varavoimatarjous
- aggregointiyhdistelmännumero (1-10), jos Säättötarjoukseen yhdistetään eri RO-tunnuksia [65]

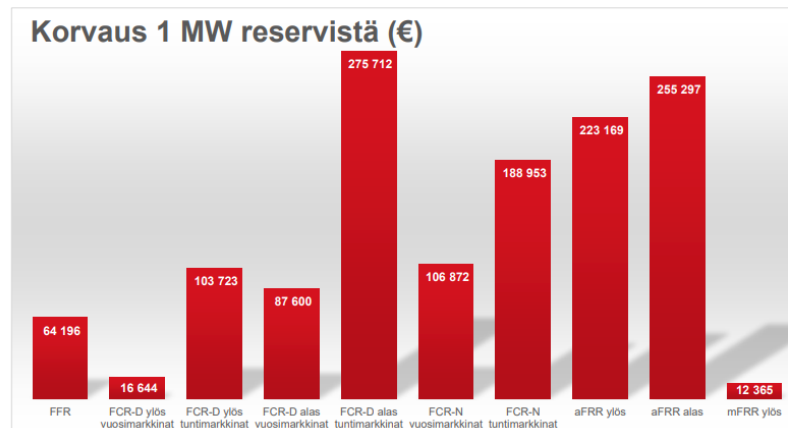
3.9.2 Korvaukset

Reservimarkkinoilta saataviin rahallisiin korvauksiin vaikuttaa valittu reservimarkkina, onko kyseessä alas- vai ylössäätö, kuinka monelle tunnille vuodessa säätöä voidaan tarjota ja mille tasolle reservien hinnat reservimarkkinoille osuvat. Korvaukset voivat vaihdella suuresti vuosien ja päivien välillä. Kuvassa 27 on esitetty vuoden 2021 korvauksista 1 MW reservistä, sillä oletuksella, että sillä pystytään osallistumaan jokaiselle käytettävissä oleville reservitunnille tai täydellä vuosimarkkinasopimusmäärällä. [64] Vuosituottoa voi arvioida seuraavalla yksinkertaisella kaavalla:

Vuosituotto (€) = hyväksytty reservikapasiteetti (MW) * reservistä maksetun korvauksen keskihinta tuntia kohden (€/MW,h) * vuositason käytettävissä olevat säätötunnit eli pysyvyys (h)

Markkina	Hinta (€/MW,h)	Tunteja per vuosi (2021)
FFR	45,4**	1414
FCR-D ylös vm	1,9*	8760
FCR-D ylös tm	12,6**	8232
FCR-D alas vm	10,0*	8760
FCR-D alas tm	32,0***	8616****
FCR-N vm	12,2*	8760
FCR-N tm	21,9**	8628
aFRR ylös	38,9	5737
aFRR alas	44,5	5737
mFRR ylös	2,3	5376

* vuosimarkkinahinta 2022
 ** volyymipainotettu keskihinta 2021
 *** volyymipainotettu keskihinta 1/2022
 **** vuoden tunnit laskettu 1/2022 toteuman mukaan



Fingrid julkaisee toteutuneet hinnat internet-sivuillaan:

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/>

Kuva 27. Esimerkkikorvauksia 1 MW reservin ylläpitämisestä. [64]

Jos reservimarkkinoille on tarjonnut reservikapasiteettia, mitä ei jostain syystä pysty toimittamaan, perii Fingrid siitä sanktiota. Sanktio määritellään tuntikohtaisesti seuraavasti:

Sanktio (€) = toimittamaton reservikapasiteetti (MW,h) x 3 x reservimarkkinoiden hinta kyseiseltä tunnilta. Sanktiota ei aiheudu, jos toimittamaton reservikapasiteetti johtuu ylivoimaisesta esteestä.

Nopean taajuusresevin (FFR) markkinoilla korvaukset maksetaan kalleimman tilatun tarjouksen mukaan. Korvaus maksetaan kapasiteetista eli reservin ei tarvitse aktivoitua korvauksen saamiseksi. Reserviä aktivoidaan matalan inertian tilanteissa ja vuositasolla tunteja tulee n. 1500. Korvaukset reservistä on useita kymmeniä euroja/MW,h. Yhdistelmätarjoukset (FFR + FCR-D ylös) ovat mahdollisia. Yhdistelmätarjouksessa FFR-kaupankäynti käydään ensin ja mikäli tarjousta ei käytetä FFR-markkinoilla, siirretään tarjous FCR-D markkinoille. [64]

Taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) markkinat on jaettu sekä alas-, että ylössäätötuotteisiin. Markkinat ovat tuntikohtaiset, mutta niille voi jättää tarjouksia joko vuosimarkkinoilla tai tuntikohtaisesti. Korvaus maksetaan ylläpidetyn kapasiteetin mukaan. Vuosimarkkinoilla syksyllä järjestetyssä tarjouskilpailussa määritetään toimijakohtainen vuosisopimusmäärä, sekä vuosimarkkinahinta tulevalle vuodelle. Vuosimarkkinahinta määräytyy kalleimman hyväksytyin vuositarjouksen mukaisesti kaikille vuosimarkkinoille osallistujille. Tuntimarkkinoilta Fingrid ostaa tarvitsemansa määrän reserviä tarvitsemilleen tunneille ja niiden hinta määräytyy kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan. Tuntimarkkinoilla kauppaa käydään lähes jatkuvasti, mutta ei kaikkina vuoden tunteina ja määrät voivat olla hyvinkin pieniä. Tuntimarkkinoilla korvaukset ovat usein suurempia, mutta vähemmän ennustettavia määrän tai korvauksen suhteen. Vuosimarkkinoilla hinta ylössäädölle on noin 4 €/MW,h ja alassäädölle noin 10 €/MW,h ja tuntimarkkinoilla ylössäädölle n. 15 €/MW,h ja alassäädölle muutamia kymmeniä euroja/MW,h. Alassäätömarkkinoilla hinnat ovat siis olleet korkeammat, mutta alassäätöä on tehty vasta muutamman vuoden ajan, joten hinnat eivät välttämättä ole vielä löytäneet omaa tasoaan. [64][67]

Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) markkinat toimivat lähtökohtaisesti samalla tavalla kuin taajuusohjatun häiriöreservin, mutta korvausta maksetaan myös ylläpidetystä energiasta kapasiteetin lisäksi. Lisäksi reservikohteen tulee kyetä sekä tehonlisäykseen että tehonpudotukseen ja näiden markkina on yhtenäinen, eli alas- ja ylössäätömarkkinoita ei ole erikseen. Vuosimarkkinoilla hinta on n. 12€/MW,h ja tuntimarkkinoilla noin kaksinkertainen vuosimarkkinaan nähden. [64][67]

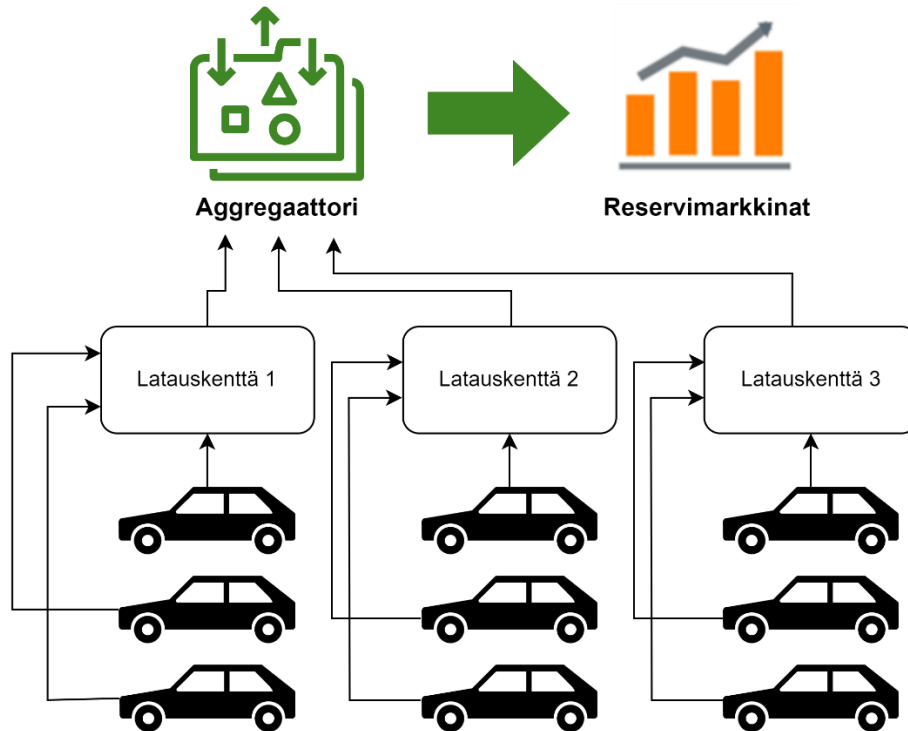
Automaattisella taajuuden palautusreservillä (aFRR) markkinat on jaettu alas- ja ylössäätömarkkinoihin ja korvaus maksetaan sekä kapasiteetista että säädetystä energiasta. Fingrid hankkii reserviä tarvitsemilleen tunneille, jotka ilmoitetaan etukäteen, mutta usein yön tunnit 01–05 ovat olleet pois markkinoilta. Kapasiteettikorvaus määräy-

tyy kalleimman hyväksytyt tarjouksen mukaisesti ja energiakorvaus määräytyy sää-
tösähkömarkkinoiden alas- ja ylössäätöhintojen mukaan. Kapasiteetin aktivointeja teh-
dään tarjouskokojen suhteessa. [64][67]

Säätösähkömarkkinalla (mFRR) jätetyistä tarjouksista maksetaan korvausta ainoas-
taan, jos säätötarjous käytetään. **Säätökapasiteettimarkkinoilta** saadaan korvausta,
vaikka säätöä ei käytettäisikään ja se on suuruudeltaan noin 10 €/MW ylös- ja alassää-
töön. Sääntösähkön hinta määräytyy pohjoismaisilla sääntösähkömarkkinoilla tarjousten
perusteella niin, että jokaiselle käyttötunnille määräytyy sekä ylös- että alassäätöhinta.
Ylössäätöhinta on aina vähintään Suomen tarjousalueen hinta, mutta hinta määräytyy
kalleimman tilatun ylössäätötarjouksen perusteella niin, että kaikki hyväksytyt tarjouk-
sen tehneet saavat saman korvauksen energiasta. Alassäätöhinta on aina enintään Suo-
men tarjousalueen hinta, mutta hinta määräytyy halvimman tilatun alassäätötarjouksen
perusteella. Kaikki hyväksytyt alassäätötarjouksen tehneet maksavat energiasta saman
alassäätöhinnan mukaan. Sääntösähkön hinnat muodostavat perustan myös tasesähkön
hinnoittelulle. Vuonna 2021 ylössäätöhinnan keskiarvo on ollut 85,87 €/MWh ja alassää-
töhinnan keskiarvo 61,13 €/MWh. [64][67]

3.9.3 Aggregointi

Aggregoinnilla tarkoitetaan pienten säätöön kykenevien tuotanto-, energiavarasto- tai
kulutuskohteiden yhdistämistä suuremmaksi kokonaisuudeksi, jolloin kohteilla voidaan
osallistua sähkömarkkinapaikoille. Aggregaattorilla tarkoitetaan palveluntarjoajaa, joka
tarjoaa aggregointia eli siis yhdistää esimerkiksi usean eri kiinteistön pientuotannon tai
sähkölämmityksen kulutuksen yhdeksi suuremmaksi kokonaisuudeksi. Havainnekuva
aggregoinnista on esitetty kuvassa 28. Aggregaattorien tulo sähkömarkkinoille lisää asi-
akkaiden ansaintamahdollisuuksia sähkömarkkinoilla. [77][78]



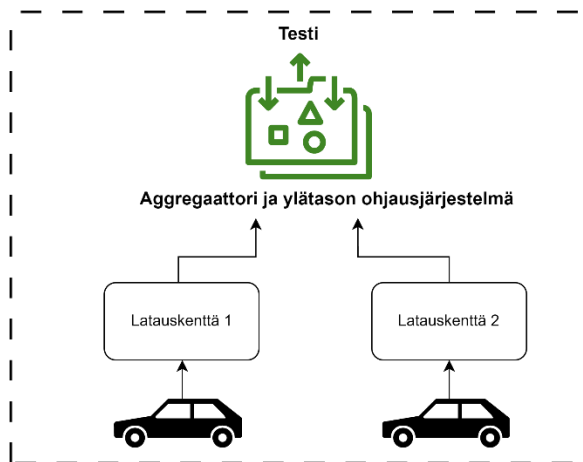
Kuva 28. Aggregoinnin toimintaperiaate yksinkertaistettuna.

Itsenäisellä aggregaattorilla tarkoitetaan toimijaa, joka ei ole aggregoitavien kohteiden sähkönmyyjä tai tasevastaava ja ohittaa siten perinteisen sähkön toimitusketjun. Säädettyjen resurssien aggregointi on tällä hetkellä sallittua kaikilla sähkömarkkinapaimarkkinoilla, mutta itsenäisten aggregaattoreiden toiminta on estetty mFRR reservissä ja kestävästä 2024 alkaen se onnistuu aFRR reservissä vain pilottihankkeissa. [74][77] Sähköajoneuvojen latausoperaattorit ovat lähtökohtaisesti sähkön ostajia, ja sähkön myyjänä sekä tasevastaavana toimii erillinen taho.

Reservimarkkinoille tarjottujen aggregoitujen reservikohteiden tulee lähtökohtaisesti koostua saman tasevastuun reserviresursseista, mutta taajuusohjatussa häiriöreservissä (FCR-D) ja nopeassa taajuusreservissä (FFR) reservikohde voi koostua myös eri tasevastuiden reserviresursseista. Tasevastaava pitää kuitenkin aina informoida reservimarkkinakäytöstä ja tasevastaavan vaihtuessa muutoksesta pitää tiedottaa kirjallisesti Fingridille vähintään 14 vuorokautta ennen tasevastaavan vaihtumista. Tämä tekee kuluttajatasolle viedyn aggregoinnin hyvin vaikeaksi toteuttaa ja tämän takia esimerkiksi sähkölämmitteisten talojen aggregointi reservimarkkinoille on ollut haastavaa. Tulevaisuudessa järjestelmien automatisoituessa, kuluttajatasolle viety aggregointikin voi muuttua helpommaksi. [70][72][75]

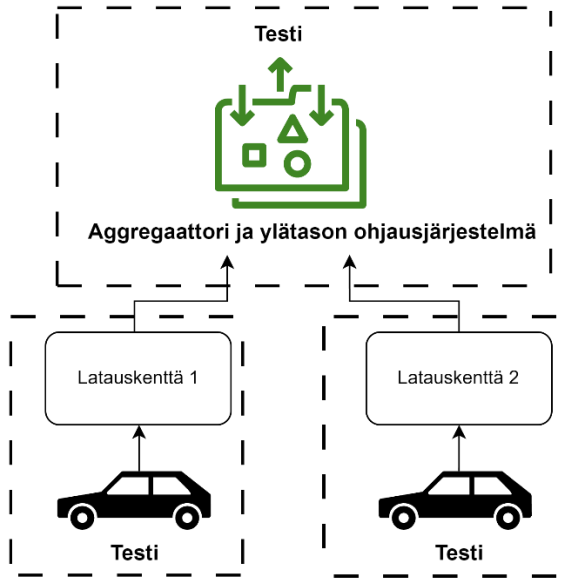
Reservikohteiden hyväksymiseksi markkinoille täytyy säätökyky todentaa säätökokeilla, joiden suorittamiseen on kolme vaihtoehtoa aggregoitavien resurssien tapauksessa. Säätökokeista yleisesti lisää kappaleessa 4.3.1.

1. Testataan aggregoitu kohde kokonaisuutena, jossa testisignaali syötetään ylä-tason ohjausjärjestelmään ja aktivoitua teho lasketaan resurssien tehojen summana. Aggregoidun kohteen tulee kokonaisuutena täyttää tekniset vaatimukset. Uusien resurssien lisääminen edellyttää säätökokeen tekemistä uudelle resurs-sille tai uudestaan koko kokonaisuudelle. Esimerkki esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Aggregoidun reservikohteen testaus kokonaisuutena. Mukailtuna läh-teestä [73]

2. Testataan yksittäiset resurssit erikseen, jolloin reservitoimittaja osoittaa, että kaikki aggregoituvat resurssit täyttävät tekniset vaatimukset. Reservitoimittajan tulee osoittaa myös, että ylätason edellytykset kuten tiedonsiirron viiveet ovat teknisten vaatimusten mukaisia. Esimerkki esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Yksittäisten resurssien testaus. Mukailtuna lähteestä [73]

3. Tyyppihyväksyntä, jossa pieniä alle 0,1 MW keskenään identtisiä kohteita voidaan aggregoida suuremmaksi kokonaisuudeksi. Tyyppihyväksynnän jälkeen samanlaisia resursseja voidaan lisätä reservikohteeseen ilman säätökokeita, mutta niistä pitää silti tehdä aina ilmoitus Fingridille. [73]

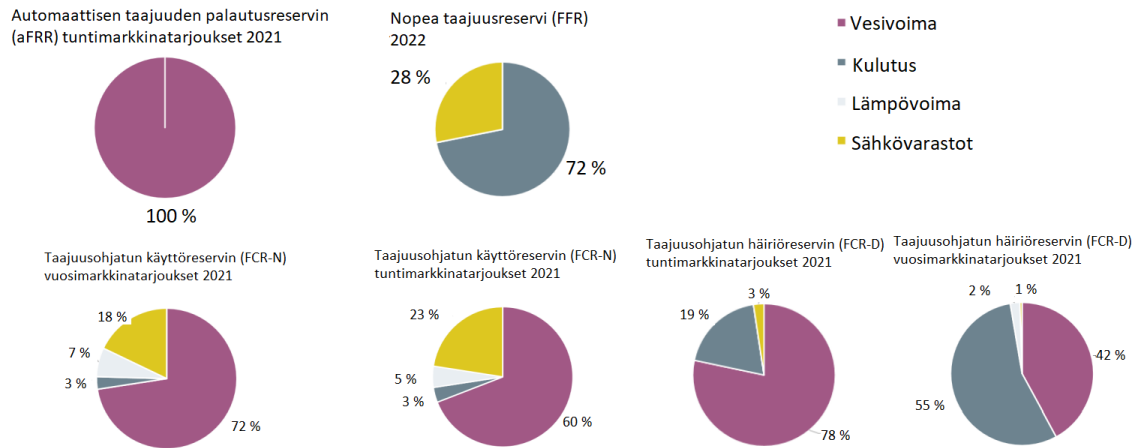
4. LATAUSKUORMAN KYSYNTÄJOUSTON KANNATTAVUUS JA VAATIMUKSET RESERVIMARKKINOILLE OSALLISTUMISEEN

Diplomityön tutkimusosuus jakautuu kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa käsitellään vaihtoehtoja mitä 1 MW kysyntäjoustokapasiteetilla latausoperaattorin näkökulmasta voisi tehdä reservimarkkinoilla ja seuraavassa osiossa käsitellään, että mistä esimerkiksi tämä 1 MW kysyntäjoustokapasiteetti olisi latausoperaattorin näkökulmasta keittävässä. Lisäksi käsitellään kaksi CASE-tilannetta, joissa perehdytään tarkemmin yksittäisen suuren toimijan mahdollisuuksiin kysyntäjoustolla, sekä akkuvarastoilla varustetun raskaan liikenteen latausasemaverkoston mahdollisuuksiin reservimarkkinoilla.

Tämän kappaleen tarkoituksena on vastata tutkimuskysymyksiin: ”Onko latausoperaattorilla mahdollisuuksia osallistua sähkön reservimarkkinoille?” ja ”Mille reservituotteiden markkinapaikoille latausoperaattorilla riittää tekniset edellytykset osallistua?”.

4.1 Markkinapaikan valinta

Markkinapaikan valinnassa on hyvä tarkastella mistä reservimarkkinoiden nykyinen kapasiteetti koostuu. Jos oletetaan, että reservimarkkinat toimivat tehokkaasti, eikä pyörää tarvitse keksiä uudestaan, voidaan olettaa sopivan markkinapaikan löytyvän sieltä, missä vastaavia resursseja on tälläkin hetkellä käytössä. Latausoperaattorin tapauksessa markkinoille osallistuttaisiin kysyntäjoustolla eli kulutuksen ajankohdan hetkittäisellä siirtämisellä myöhempään. Kuvassa 31 on esitetty reservimarkkinoittain eri tuotantomuotojen osuudet vuonna 2021 ja nopean taajuusreservin kohdalla vuonna 2022. Kuvasta näemme, että vesivoima hallitsee reservimarkkinoita hyvin paljon ja kulutuksen avulla osallistutaan lähinnä nopeampiin taajuusohjattuihin reservimarkkinoihin. [79]



Kuva 31. Reservimarkkinoihin osallistuvat tuotantomuodot. [79]

Tästä voidaan päätellä, että todennäköisesti kysyntäjoustolla olisi kannattavinta osallistua taajuusohjatuille reservimarkkinoille. Nopeasta taajuusreservistä jopa 72 % ja taajuusohjatusta häiriöreservistäkin merkittävä osa tapahtui kulutusta säättämällä.

Taajuusohjatuille markkinapaikoille osallistuminen vaatii kuitenkin erittäin tarkan taajuusmittauksen ja nopean reagoinnin taajuuden muuttumiseen. Pilvipohjaisella kuormanhallinnalla ei ole mahdollista osallistua FFR markkinalle, jossa reagointiajat ovat jopa alle sekunnin tai edes FCR-D ylössäättömarkkinalle, jossa 50 % kapasiteetista pitäisi olla käytettävissä 5 sekunnissa taajuuden muutoksesta. Nopeammat markkinapaikat vaativat aina paikallisen taajuusmittaukseen perustuvan ohjauksen. Suuremmilla yksittäisillä latauskentillä paikallisen mittauksen sekä ohjauksen rakentaminen voisi olla taloudellisesti järkevää, mutta pienemmille latauspaikoille kuten kotilataukseen taajuusohjauksen ja reaaliaikaisen tiedonvaihdon muodostavat kustannukset kasvavat liian suureksi suhteessa saatavaan hyötyyn. Paikalliseen taajuuden mittaukseen perustuvan ohjausjärjestelmän rakentamisen jälkeen FCR-D markkina sopisi hyvin latausoperaattorille, sillä säädettävät ajat ovat keskimäärin lyhyitä, jolloin itse lataustapahtuma häiriintyy suhteellisen vähän, mutta silti järjestelmällä on sekunteja aikaa reagoida taajuuden muutoksiin. FFR reservin reagointivaatimukset ovat niin kovat, että niihin ei välttämättä päästä paikallisella ohjauksella.

Siirryttäessä reserveissä pykälää hitaampaan eli FCR-N markkinapaikalle, muodostuu ongelmaksi markkinapaikan symmetrisen säädön vaatimus. Latausoperaattori ei kysyntäjoustolla pysty osallistumaan symmetriseen säätöön ilman lataustehon jatkuvaa rajoitusta, joka mahdollistaisi alassäättökapasiteetin. Manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) minimi tarjouskoko on 5 MW ja reservikohteiden itsenäinen aggregointi ei ole sallittua, joten mFRR-markkinalle osallistuminen ei latausoperaattorilta onnistu. Au-

tomaattiseen taajuuden palautusreserviin (aFRR) on voinut varttitaseen siirtymisen jälkeen osallistua myös itsenäinen aggregaattori ja markkinalla on mahdollista osallistua ainoastaan ylössäätöön, joten näiden puolesta markkinapaikka on soveltuva sellaiseen latausoperaattorille.

Latausjärjestelmien teknisten ominaisuuksien perusteella parhaimmat reservilajit ovat latausoperaattorille FCR-D ja aFRR markkinoiden ylössäätöreservit. Molemmissa reservimarkkinoissa voidaan osallistua vain ylössäätöön, reservikohteiden itsenäinen aggregointi on mahdollista, minimi tarjouskoko on 1 MW ja aktivoinnin nopeusvaatimukset ovat saavutettavissa. Seuraavissa kappaleissa keskitytään ainoastaan näihin kahteen soveltuvimpaan reservilajiin.

4.2 Saatavilla olevat tuotot

Reservimarkkinoilta saatavia tuottoja on kuvattu pintapuolista kappaleessa 3.9.2. Tässä kappaleessa lasketaan tarkemmin aFRR- ja FCR-D markkinoilta saatavia tuottoja 1 MW kysyntäjoustokapasiteetilla. Laskennassa käytetään viimeisimmän kokonaisen vuoden tilastoja. Tuloksia verrataan myös kuluvaan vuoteen, sillä sähkömarkkinoiden näkökulmasta ne ovat poikenneet toisistaan merkittävästi. Aineisto on kerätty Fingridin avoimesta datasta. [67]

4.2.1 Automaattinen taajuuden palautusreservi

Ylössäätökapasiteetista aFRR markkinoilta maksettava korvaus oli vuonna 2022 keskimäärin 117,9 €/MWh ja ylössäätökapasiteettia tilattiin yhteensä 7127 tunnilta. Viime vuosina aFRR-markkina oli avoinna lähtökohtaisesti 20 h päivässä aikavälin 01–05 ulkopuolella, mutta reservin tarpeen kasvun seurauksena markkinaa ollaan lähitulevaisuudessa avaamassa toimimaan vuoden jokaisena tuntina. Ylössäätökapasiteetin määrä vuonna 2022 oli keskimäärin 51,7 MW,h. Oletetaan, että latausoperaattorin kapasiteettitarjous on ollut niin alhainen, että se on hyväksytty jokaiselle tunnille ja saatu näin ollen keskiarvon mukainen marginaalihinta.

Reservimarkkinoilta saatu vuosittainen tuotto lasketaan seuraavasti:

Vuosituotto (€) = hyväksytty reservikapasiteetti (MW) * reservistä maksetun korvauksen keskihinta (€/MW,h) * vuositason käytettävissä olevat säätötunnit eli pysyvyys (h)

Reservikapasiteetin ollessa 1 MW, reservistä maksetun korvauksen keskihinnan ollessa 117,9 €/MW,h ja vuositason pysyvyyden ollessa 7127 tuntia, saadaan vuosituotto seuraavasti:

$$\text{Vuosituotto 2022 (€)} = 1 \text{ MW} * 117,9 \text{ €/MW,h} * 7127 \text{ h} = 840\,273,3 \text{ €}$$

Tässä on huomioitava, että vuonna 2022 sähkön ja automaattisen palautusreservin hinnat olivat poikkeuksellisen korkeat. Vuonna 2023 reservin hinta on palautunut aikaisempien vuosien tasolle ja 30.6.2023 mennessä vuoden keskihinta on ollut 34,8 €/MW,h. Alkuvuoden 2023 hinnalla ja samalla 7127 h tuntimäärällä vuosituotoiksi muodostuisi 248 019,6 €, jota voidaan pitää pidemmän aikavälin realistisena tasona. Aikaisempina vuosina hintataso on ollut lähellä 2023 hintoja.

Kapasiteettimarkkinoilta saatavien tuottojen lisäksi Fingrid maksaa aFRR markkinoilla korvauksen myös säädetyistä energiasta tasevastaavalle taseselvityksen yhteydessä. Energiasta maksettava hinta muodostuu säätösähkömarkkinoiden hinnan muodostuksen mukaisesti. Ylössäätömarkkinoilta aktivoitiin energiaa vuonna 2022 yhteensä 5375 tunnin aikana ja aktivoitu energia oli keskimäärin 16,2 MWh. Ylössäätösähkön hinta oli vuonna 2022 keskimäärin 178,9 €/MWh ja 9.6.2023 mennessä vuoden 2023 keskihinta on ollut 73,4 €/MWh. Ylössäätöhinta on aina vähintään Suomen tarjousalueen sähkön hinta, mutta lopullinen hinta määräytyy kalleimman tilatun ylössäätötarjouksen perusteella. Kaikki hyväksytyt tarjoukset tehneet saavat saman korvauksen energiasta. Kapasiteetista aktivoidaan energiaa tarjouskokojen suhteessa, joten pienellä 1 MW tarjouksella tulisi aktivointeja oletettavasti melko vähän, jolloin saatavilla olevat tuotot perustuisivat lähtökohtaisesti vain kapasiteetista saataviin tuottoihin.

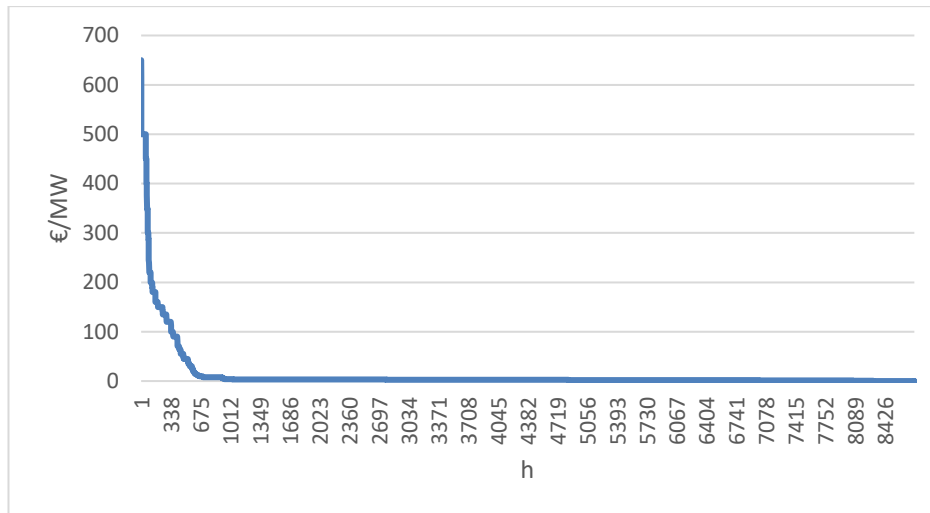
4.2.2 Taajuusohjattu häiriöreservi

Ylössäätökapasiteetista FCR-D tuntimarkkinoilta maksettava korvaus oli vuonna 2022 keskimäärin 13,6 €/MW,h ja ylössäätökapasiteettia on tilattu viime vuosina keskimäärin n. 8200 tunnilta. Ylössäätökapasiteetin määrä vuonna 2022 oli keskimäärin 43 MW,h. Oletetaan, että latausoperaattorin kapasiteettitarjous on ollut niin alhainen, että se on hyväksytty jokaiselle tunnille ja saatu näin ollen keskiarvon mukainen marginaalihinta.

$$\text{Vuosituotto 2022 (€)} = 1 \text{ MW} * 13,6 \text{ €/MW,h} * 8200 = 111\,520 \text{ €}$$

Vuoden 2023 ensimmäisen vuosipuoliskon aikana taajuusohjatun häiriöreservin ylössäätökapasiteetin keskihinta tuntimarkkinoilla on ollut 22 €/MW,h. Sillä hinnalla ja samalla pysyvyydellä vuoden reservikapasiteettikorvaukseksi muodostuisi 180 400€.

Tässä kannatta huomioida, että reservikorvaukset eivät kulje eri reservilajien suhteen käsikädessä, sillä aFRR reservin hinta on laskenut merkittävästi vuoden 2022 ja 2023 välillä ja FCR-D markkinalla hinta on puolestaan noussut selkeästi. Reserveistä maksettavat korvaukset heiluvat voimakkaasti vuodesta ja päivästä toiseen, joten investointipäätöksiä ei kannata tehdä lyhyen aikavälin trendin mukaan. Vuoden 2023 alkupuoliskon aikana taajuusohjatun häiriöreservin hinta tuntimarkkinoilla on vaihdellut 0,78–450 €/MW välillä, mediaanihinnan ollessa 3,5 €/MW. Kapasiteettitarjouksia aktivoidaan hintaperusteisesti, joten jos kokonaiskapasiteetin tarve on matala, jää hintakin hyvin matalaksi. Kun kapasiteettia tarvitaan puolestaan normaalia enemmän, nousee kapasiteetista maksettava hinta nopeasti korkeammaksi marginaalihinnoittelun takia. Tämän takia suurin osa vuositason tuotoista on mahdollista saavuttaa osallistumalla hyvin pieneen osaan tarjottavista tunneista. Koko vuoden 2022 toteutuneiden FCR-D reservikapasiteettikorvausten perusteella laskettuna n. 85 % vuositason tuotoista on mahdollista saavuttaa osallistumalla vain n. 10 % tarjotuista tunneista, verrattuna tilanteeseen, jossa osallistutaan jokaiselle markkinalla tarjolla olevalle tunnille hinnasta välittämättä. Vuoden 2022 osalta näihin lukuihin päästiin asettamalla tarjouksen rajahinnaksi 5 €/MW. Silloin kun reservitarjousta ei hyväksytä, voidaan akustoa hyödyntää esimerkiksi sähkön hinnan vaihtelun hyödyntämiseen. Vuoden 2023 korkeammilla reservikorvausten hinnoilla ja samalla 5 €/MW rajahinnalla suodattuisi 52 % reservikäytöstä pois, mutta saatujen korvausten summa pienenesi ainoastaan 5 %. Vuoden 2022 kapasiteettikorvaus pysyvyyskäyrällä eli asettamalla vuoden tunnit korvauksen mukaan suuruusjärjestykseen suurimmasta pienimpään on esitetty kuvassa 32.

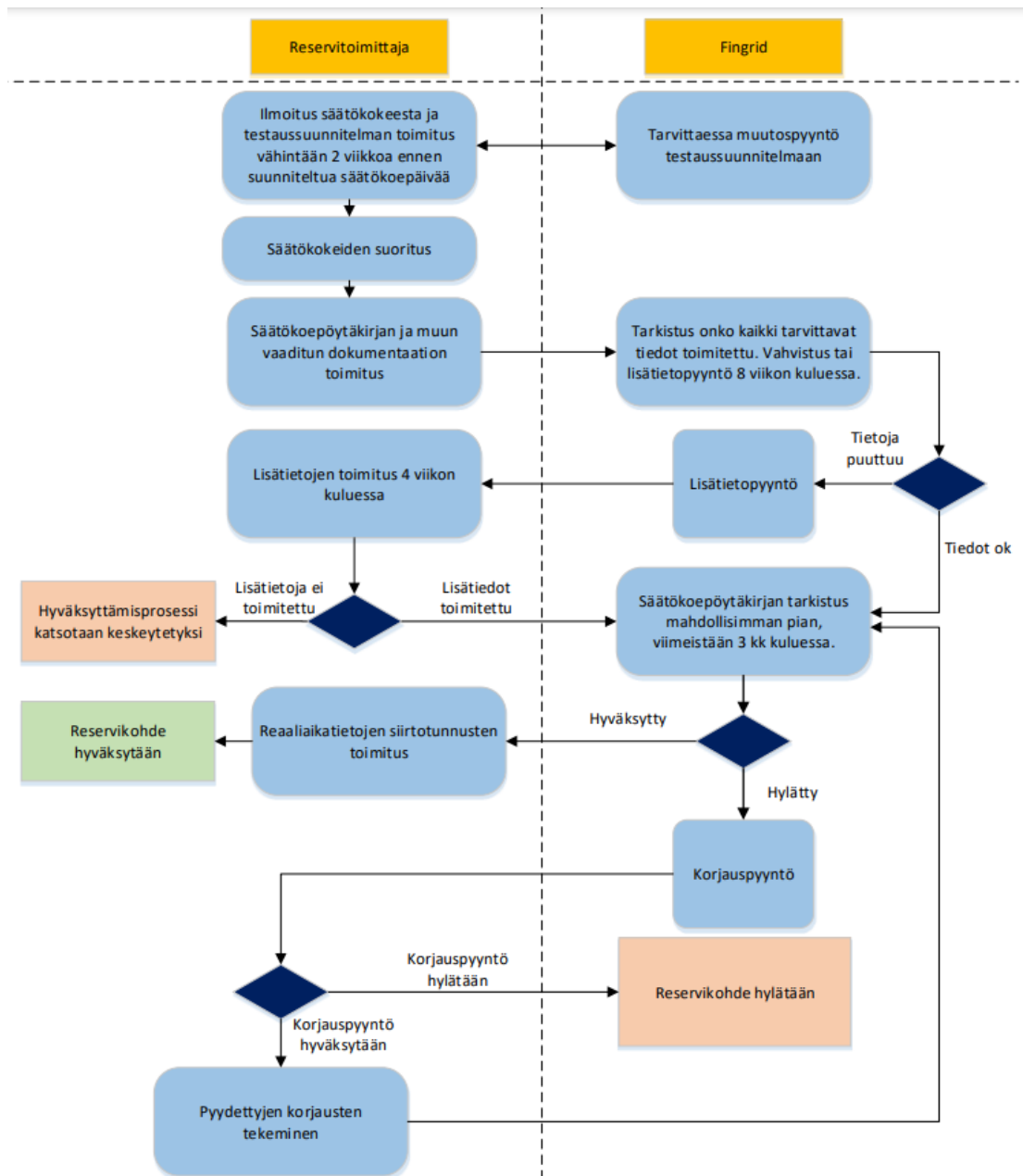


Kuva 32. FCR-D reservistä maksettavan korvauksen suuruus pysyvyyssäyrällä.
Muokattu lähteestä. [67]

Taajuusohjatun häiriöreservin ylläpidosta ei makseta erikseen energiakorvausta, vaan korvaus perustuu ainoastaan ylläpidettyyn kapasiteettiin. Säätöön käytettävät energiamäärät ovat keskimäärin hyvin pieniä, sillä säätöajat ovat usein vain muutamien sekuntien luokkaa, jolloin energian osuus säädön kustannuksista on hyvin marginaalinen. Lyhyet säätöajat aiheuttavat myös lähtökohtaisesti vähemmän häiriötä latausoperaattorin pääasialliseen toimintaan, eli sähköajoneuvojen lataamiseen.

4.3 Osallistumisen vaatimukset

Reservimarkkinoille osallistumiseksi täytyy tehdä reservimarkkinasopimus Fingridin kanssa. Tunti- tai vuosimarkkinasopimuksen voi tehdä, jos täyttää reservimarkkinan tekniset vaatimukset sekä suorittaa säätökokeet hyväksytysti. Teknisten vaatimusten todentaminen ja reservikohteen hyväksyttämisen prosessi aFRR- ja FCR-D-markkinoille etenee kuvan 33 mukaisesti.



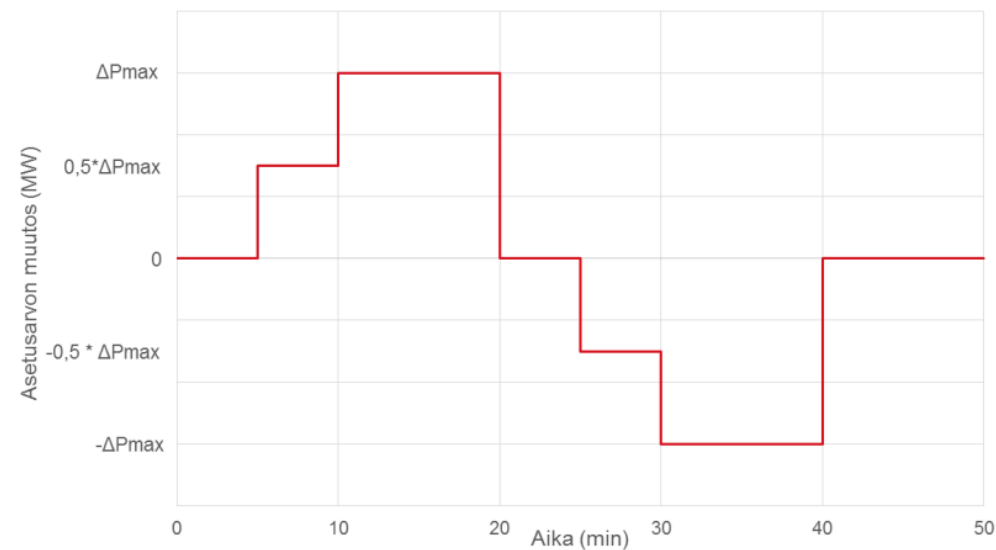
Kuva 33. Teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi. [76]

4.3.1 Säätökoe

Soveltuvan reservikohteen hyväksyttämisprosessi alkaa säätökokeiden suunnittelulla. Säätökokeiden testaussuunnitelma pitää olla toimitettu Fingridille vähintään 2 viikkoa ennen säätökoehetkeä. Reservitoimittaja vastaa säätökokeiden suorittamisesta, mutta Fingridillä on oikeus lähettää edustajansa mukaan säätökokeisiin. Säätökokeen tarkoituksena on varmistaa, että reservikohde täyttää reservipaikan tekniset vaatimukset ja vaadittavat yhteydet ja signaalinvaihto Fingridin kanssa toimii halutulla tavalla. Säätökoe tulee suorittaa reservikohteen normaalissa käyttötilanteessa. Jos säätökoetta ei pystytä

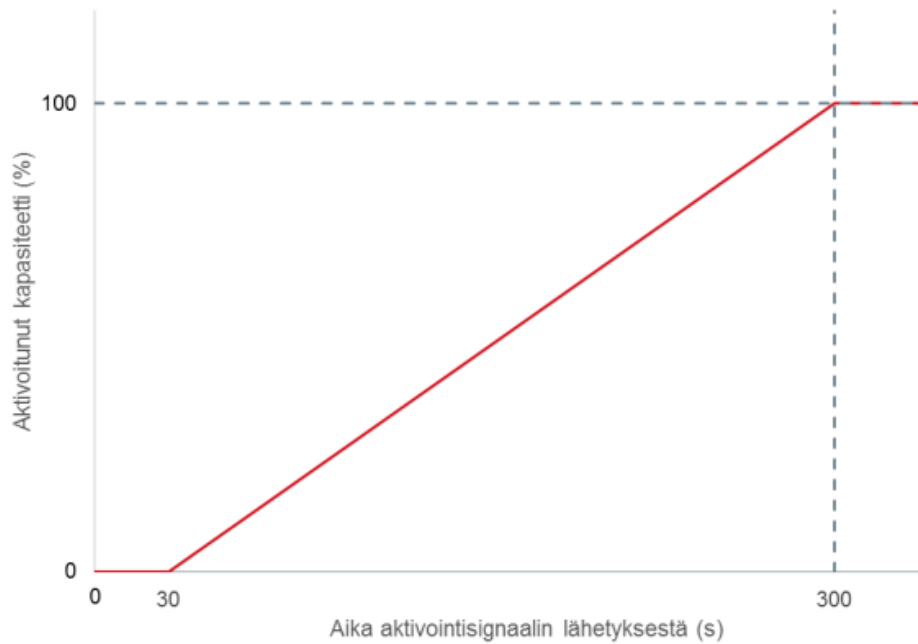
suorittamaan Fingridin vaatimusten mukaisesti, voidaan säätökokeen suorittamiseen sopia myös vaihtoehtoisia menetelmiä.

Automaattisen taajuuden palautusreservin säätökokeessa Fingrid lähettää kuvan 34 mukaisen testisekvenssin reservikohteelle. Sekvenssissä testataan reservikohteen suurimmat ylös- (ΔP_{\max}) ja alassäätömahdollisuudet ($-\Delta P_{\max}$). Maksimisäätökyky muodostaa reservin markkinoille tarjottavan säätökapasiteetin. Testi voidaan tehdä myös manuaalisesti, jos testisekvenssiä ei ole mahdollista syöttää sellaisenaan. [76] Jos reservikohde kykenee ainoastaan ylös- tai alassäätöön, tulee se näkyä selvästi testipöytäkirjassa.



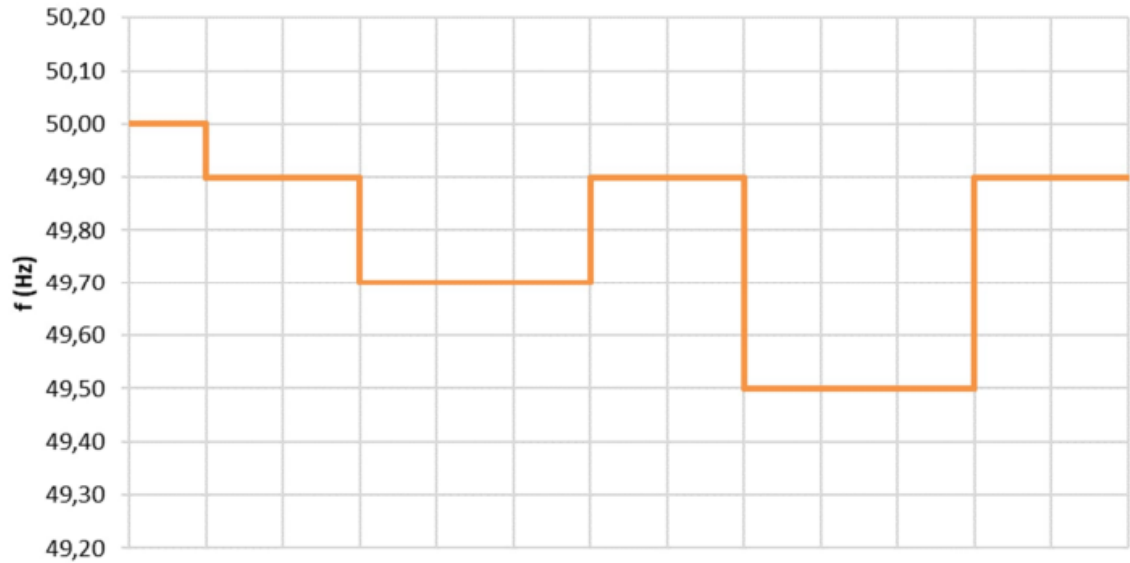
Kuva 34. Säätökokeen testisekvenssi aFRR-markkinassa. [76]

Testisekvenssin aikana reservikohteen tulee aloittaa reservikapasiteetin aktivointi viimeistään 30 sekunnin kuluessa aktivointisignaalin muutoksesta ja koko reservikapasiteetti tulee olla käytössä 5 minuutissa. Reagointivaatimus on esitetty kuvassa 35. Rajallisen aktivointikyvyn reservikohteen kuten energiavaraston tulee kyetä vähintään 1 h ajan täyteen säätökapasiteettiin. [64]



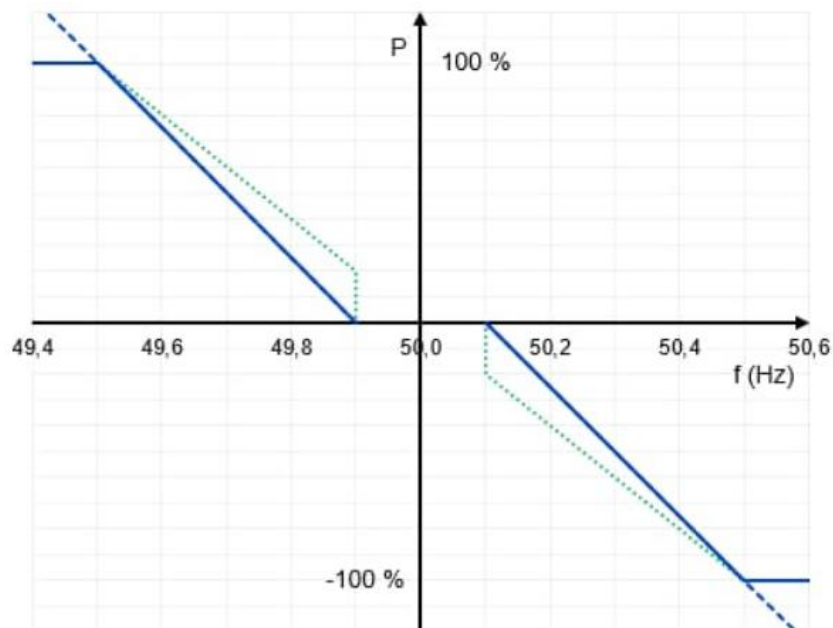
Kuva 35. Minimi aktivointinopeus aFRR-reservissä. [76]

Taajuusohjatun häiriöreservin säätökokeessa ylössäätöreservi testataan kuvan 36 mukaisella askelvastekokeella. Reservikohteen taajuusmittaukseen syötetään haluttua taajuuspoikkeamaa ja taajuusmuutoksen aiheuttamaa tehonmuutosta seurataan kahden minuutin ajan. Reagoinnin rekisteröintilaitteiden näytteenottoväli saa olla enintään 0,2 sekuntia. Säädön on aktivoitettava, kun syötetty taajuusohje laskee alle 49,9 Hz:n ja kasvaa lineaarisesti täyteen säätökapasiteettiin, joka tulee olla käytössä, kun taajuus on 49,5 Hz tai alle. Täysi säätökapasiteetti määräytyy sen mukaan, kumpi seuraavista muutoksista on pienempi askelmaisen 0,5 Hz:n taajuusmuutoksen seurauksena: taajuusmuutoksen jälkeen 30 sekunnissa aktivoitunut teho tai muutoksen jälkeen 5 sekunnissa aktivoitunut teho kerrottuna kahdella. Säädön tulee olla lineaarista taajuuden suhteen, jonka takia mitataan säätöteho myös 49,7 Hz taajuudelta. Reservikohteen tulee ylläpitää säätökapasiteettia niin kauan kun taajuuspoikkeama kestää. Rajallisen aktivointikyvyn, kuten energiavaraston, tulee kyetä vähintään 20 minuutin täyteen säätökapasiteettiin. Rajoitetun aktivointikyvyn reservikohteet tulee hyväksyttävä erikseen markkinoille. [76]



Kuva 36. Taajuusohjatun häiriöreservin ylössäädön todentamisen testisekvenssi. [73]

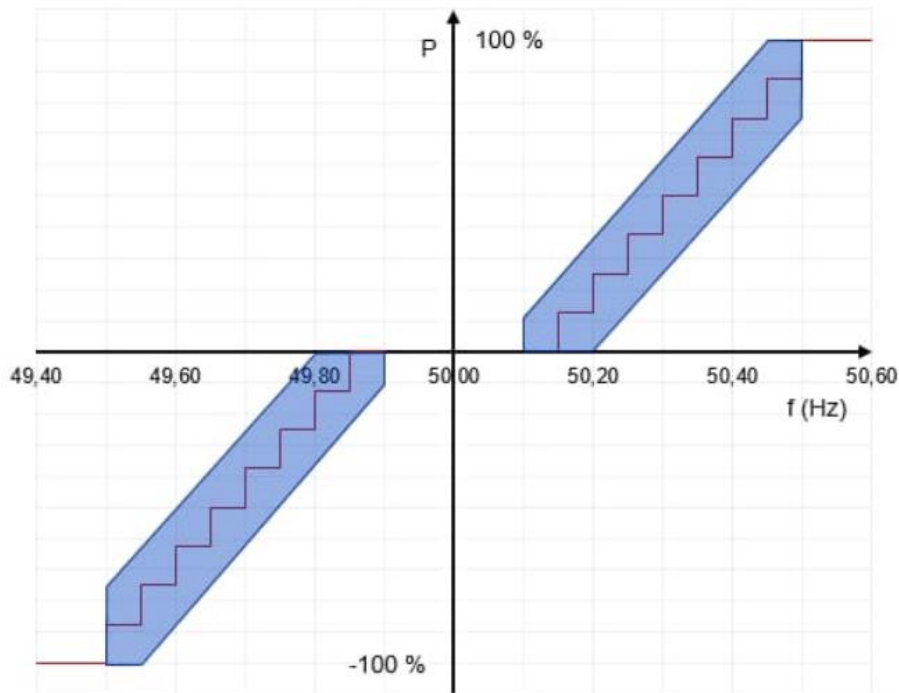
Säätökokeen aikana seurataan reservin säätöominaisuuksia, jotta tekniset vaatimukset täyttyvät. Jos reservikohde kykenee lineaariseen säätöön, tulee sen noudattaa kuvan 37 mukaisia säätökäyriä. Sekä **sininen** että **vihreä** säätökäyrä ovat sallittuja ja säätö saa jatkua lineaarisesti myös säätöalueen ulkopuolelle **sinisen** katkoviivan mukaisesti. [73]



Kuva 37. FCR-D lineaarinen säätökäyrä. [73]

Jos reservikohde ei kykene täysin lineaariseen säätöön, tulee säätökäyrän olla paloittain lineaarinen kuvan 38 mukaisesti. Askelmaisen säädön tulee aktivoitua ja pysyä kuvan

sinisen alueen sisällä, kuten kuvassa näkyvä **punainen** esimerkki. Toteutunut säätökäyrä tulee dokumentoida selkeästi säätökoepöytäkirjaan tai tulla esiin säätöjärjestelmän teknisessä kuvauksessa. [73]



Kuva 38. Sallittu paloittain lineaarinen FCR-D säätöalue. [73]

Säätökokeista tehdään vapaamuotoinen säätökoepöytäkirja, joka toimitetaan sähköisesti Fingridille säätökokeen jälkeen. Säätökokeiden voimassaoloaika on 5 vuotta, jos järjestelmään ei sillä aikaa tehdä reservikäyttöön vaikuttavia muutoksia. Jos säätökoepöytäkirjassa on kaikki tarpeellinen tieto ja lisätietoja ei tarvita, voidaan reservikohde hyväksyä reservimarkkinoille ja Fingrid toimittaa tunnukset reaaliaikatietojen toimitukseen ja kaupankäyntiin. Fingridin pyytäessä lisätietoja tai korjauspyyntöjä säätökokeeseen liittyen on reservitoimittaja velvollinen toimittamaan ne neljän viikon kuluessa tai hyväksyttämisen prosessi katsotaan keskeytetyksi. [76]

4.3.2 Mittausvaatimukset

FCR-D reservikohteen aktivoitumiseen tarvittava taajuusmittaus voidaan toteuttaa mistä tahansa Suomen sähköjärjestelmästä. Taajuusmittauksen tarkkuus tulee olla vähintään ± 10 mHz ja mittausresoluutio 1 mHz.

Pätötehomittaus tulee toteuttaa 0,01 MW resoluutiolla ja vaadittava mittaustarkkuus riippuu reservikapasiteetin nimellistehosta. Sallittu epätarkkuus suhteessa kapasiteetin nimellistehoon on esitetty taulukossa 6. [73]

Taulukko 6 Pätötehomittauksen tarkkuusvaatimus FCR-D reserville. [73]

Kategoria	Nimellisteho	Sallittu epätarkkuus
A	$P < 1,5 \text{ MW}$	5 %
B	$1,5 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	1 %
C + D	$10 \text{ MW} \leq P$	0,5 %

Aktivoituvan automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) säätötehon tulee olla $\pm 10 \%$ tehopyynnöstä ja tehonmittauksen tarkkuus vähintään 0,1 MW, joten mittausvaatimukset ovat selkeästi yksinkertaisemmat, kuin FCR-D reservin suhteen. [76]

4.3.3 Tiedonvaihtovaatimukset

Haasteeksi aFRR-markkinapaikalla muodostuu reaaliaikaisen tiedonvaihdon järjestäminen Elcom- (TASE.1) tai ICCP- (TASE.2) protokollan mukaisesti FEN- tai KoVa-FEN-verkossa. FEN eli Finnish Elcom Network on Fingridin ja energiayhtiöiden välinen yksityinen verkko, minkä avulla eri toimijoiden valvomot pystyvät kommunikoimaan. KoVa-FEN on päivitetty versio FEN-verkosta, joka toteuttaa Korkean Varautumisen periaatteita ja mahdollistaa tietoliikenne- ja puheyhteydet vähintään 24 tunnin ajaksi, vaikka kantaverkko olisi ajettu alas suurhäiriön takia. Jos liityntää FEN-verkkoon ei ole, se täytyy muodostaa tai se voidaan ulkoistaa erilliselle valvomotoimijalle, jolla on ennestään FEN- tai KoVa-FEN-liityntä.

Reaaliaikaraportointi aFRR-markkinalla tapahtuu enintään 10 sekunnin päivitysvälillä ja vähintään 0,1 MW tarkkuudella. Reservikohteen reaaliaikatiedonsiirron tulee sisältää seuraavat tiedot:

- aFRR-kapasiteetti ylös
- aFRR-kapasiteetti alas
- aktivoituneen reservin määrä
- reservikohteen hetkellinen pätöteho
- Fingridin aktivointisignaalin vastaanotto ja sen takaisinlähetyt

FCR-D markkinalla reaaliaikatiedonsiirtoon voidaan käyttää FEN- tai KoVa-FEN-verkon lisäksi IEC 60870-5-104-protokollan web-tiedonsiirtoa. Tiedonvaihto tapahtuu enintään 60 sekunnin päivitysvälillä ja reservimäärän raportoinnissa on käytettävä vähintään

0,1 MW tarkkuutta pois lukien mittaustarkkuusluokan A reservikohteet (kts. Taulukko 6), joissa tarkkuuden on oltava vähintään 0,01 MW. Reservikohteen reaaliaikatiedonsiirron tulee sisältää seuraavat tiedot:

- ylläpidettävä reservimäärä FCR-D ylössäätö (MW)
- ylläpidettävä reservimäärä FCR-D alassäätö (MW)

Lisäksi rajallisen aktivointikyvyn kuten energiavarastojen tapauksessa:

- jäljellä oleva aktivointikyky (min) ylössäätöön
- jäljellä oleva aktivointikyky (min) alassäätöön
- normaalitilan varaustason hallinnan status (on / off)
- hälytystilan varaustason hallinnan status (on / off)

Ylläpidettävä reservimäärä tarkoittaa todellista käytettävissä olevaa reservikapasiteettia kyseisellä hetkellä. Reservin aktivoituminen ei saa pienentää ylläpidettävää määrää eli jos 1 MW ylläpidetystä reservimäärästä aktivoidaan 0,5 MW, tulee aktivoinnin aikana olla käytössä vielä 0,5 MW lisäkapasiteettia valmiina. Jäljellä oleva aktivointikyky tarkoittaa sitä määrää minuuteissa, johon nykyinen energiamäärä riittää täyden kapasiteetin aktivoinnilla. [65]

Reserveistä maksettavien korvausten laskutus Fingridiltä perustuu toimitettuihin reaaliaikatieoihin. Lisäksi FCR-D reservitoimittajan tulee säilyttää reservikohteiden historia-tietoja vähintään 14 vuorokauden ajan ja ne tulee toimittaa Fingridille aina kysyttäessä. Reservikohteiden lähetettävät reaaliaikasisignaalit ja kerättävät historiatiedot löytyvät liitteistä A ja B.

5. MAHDOLLISUUDET RESERVIKAPASITEETIN KERÄÄMISEKSI

Plugit Oy tarjoaa ratkaisujaan kaikille latausta tarvitseville siellä missä latausta tarvitaan, mutta firman pääasialliset tuotesegmentit ovat: Taloyhtiöt, Työpaikat ja yritykset, Julkinen lataus ja Ammattiliikenne. Tässä kappaleessa käydään läpi mahdollisuuksia kyseisten segmenttien latausjärjestelmillä osallistua sähkön reservimarkkinoille. Tämän kappaleen tarkoitus on vastata tutkimuskysymykseen ”Onko latausoperaattorin reservimarkkinoille osallistuminen taloudellisesti järkevää liiketoimintaa?”.

5.1 Taloyhtiöt

Taloyhtiöiden latausjärjestelmät koostuvat usein useista lataustavan 2 tai 3 vaihtovirtalatureista, joiden teho vaihtelee 1,8 kW ja 22 kW välillä. Usein latausjärjestelmälle varattu kokonaisteho taloyhtiössä on useita kymmeniä tai jopa satoja kilowatteja ja varustettu dynaamisella kuormanhallinnalla. Taloyhtiöiden latausjärjestelmien käyttöasteet ovat keskimäärin pieniä ja sähköautoja on vielä suhteellisen vähän taloyhtiön asukkaiden autokannasta minkä takia kokonaislataustehot jäävät usein hyvin pieniksi reservimarkkinoiden näkökulmasta. Lisäksi asukkaiden latauskäyttäytyminen voi vaihdella paljon ja lataustehon ennustaminen on haastavaa. Taloyhtiöiden latausjärjestelmiä on itsessään erittäin hankala yhdistää reservimarkkinoille, sillä lataustehot ovat keskimäärin hyvin pieniä ja reservimarkkinoiden minimi tarjouskoon ylätämiseksi pitäisi aggregoida jopa satoja eri taloyhtiöiden latausjärjestelmiä. Reservikäytöstä tulee aina ilmoittaa reservikohteen tasevastaavalle ja tasevastaavan vaihtuessa reservintoimittajan tulee ilmoittaa vaihdoksesta Fingridille vähintään 14 vuorokautta ennen vaihdosta. Kymmenien tai jopa satojen eri taloyhtiöiden tasevastaavien kanssa kommunikointi ja taloyhtiöiden latausjärjestelmän rakentaminen reservimarkkinoille soveltuvaksi muodostuu aivan liian työlääksi saatavilla oleviin hyötyihin nähden. Tulevaisuudessa sähköyhtiöiden järjestelmien automatioasteen kasvaessa, voi tilanne helpottua.

Jos taloyhtiöllä on jotain muuta reservimarkkinoille soveltuvaa säätökapasiteettia tai taloyhtiö on mukana jossain suuremmassa energiayhteisössä, josta säätökapasiteettia löytyisi valmiiksi, voitaisiin ajoneuvojen latausjärjestelmä liittää helposti näihin ja kasvatata latausjärjestelmällä muuta reservikapasiteettia entuudestaan. Pelkällä latausjärjestelmällä ei taloyhtiöiden tapauksessa kuitenkaan pystytä taloudellisesti järkevällä tavalla osallistumaan reservimarkkinoille.

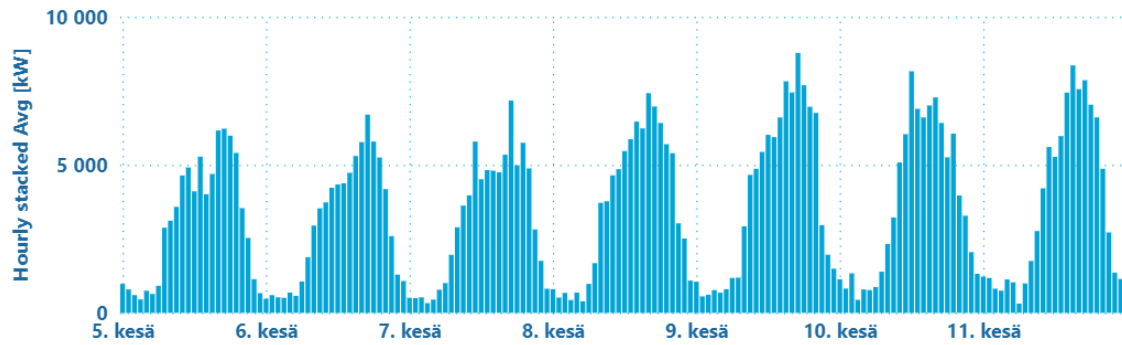
5.2 Työpaikat ja yritykset

Työpaikka ja yrityskäyttöön tarkoitetuilla latausratkaisuilla voidaan ladata työntekijöiden, asiakkaiden, yhteistyökumppaneiden kuin myös yrityksen omia ajoneuvoja. Yritys voi jakaa sähköä ilmaiseksi tai korvausta vastaan. Latausjärjestelmät ovat usein lataustavan 3 mukaisia. Latausjärjestelmän soveltaminen reservimarkkinoille on lähtökohtaisesti yhtä haastavaa kuin taloyhtiöiden kohdalla, johtuen suhteellisen pienistä lataustehoista. Yritysten tapauksessa kiinteistön muu sähkön kulutus voi olla selkeästi suurempaa kuin taloyhtiöiden kohdalla, joka voi mahdollistaa reservimarkkinoiden vaatiman säätökapasiteetin löytymisen muualta kiinteistön prosesseista. Jos kiinteistön muusta sähkönkulutuksesta löytyy tarpeeksi säätökapasiteettia reservimarkkinoille, voidaan latausjärjestelmä lisätä siihen, mutta pelkällä latausjärjestelmällä reservimarkkinoille osallistuminen ei käytännössä ole mahdollista. Useiden eri yritysten latausjärjestelmien aggregoinnissa törmätään samaan ongelmaan kuin taloyhtiöidenkin kohdalla, eli reservimarkkinoiden minimitarjouskokoon pääsemiseksi tarvitsisi aggregoida useita kymmeniä tai satoja eri kohteita, joiden tasevastuiden selvittäminen ja ylläpito on käytännön tasolla mahdotonta.

5.3 Julkinen lataus

Julkisella latauksella tarkoitetaan latauspaikkaa, joka on kaikkien saatavilla. Julkisia latauspaikkoja ovat esimerkiksi kauppakeskusten tai huoltoasemien yhteyteen rakennetut latauspaikat. Julkiset latauspisteet ovat aina lataustavan 3 tai 4 mukaisia. Lataustavan 3 vaihtovirtalaturit ovat teholtaan usein 11–22 kW ja lataustavan 4 tasavirtalaturit 50–250 kW. Latauspisteitä hallinnoi usein erillinen latausoperaattori, jonka kanssa lataaja tekee sopimuksen lataamisen aloittamiseksi ja latauksen maksamiseksi. Latauspaikkojen sähkö voi tulla kiinteistön sähkönsyötöstä tai latauskentällä voi olla oma sähköliittymä, jonka kautta latauskentän sähköt ovat täysin erillään kiinteistön muusta sähkönsyötöstä. Suurien latauskeskittymien kohdalla on usein välttämätöntä ottaa erillinen sähköliittymä latauspaikoille, sillä kiinteistön nykyinen sähköliittymä tai sähköpääkeskus ei kestä kasvannutta kuormitusta.

Suuret latausoperaattorit hallinnoivat yleensä kansallisesti suurta määrää latauspaikkoja, joka mahdollistaisi riittävän minimikapasiteetin keräämisen reservimarkkinoille. Kuvassa 39 on esitetty suuren kansallisen latausoperaattorin lataustehomäärät viikossa. Lataustehot keskittyvät pääsääntöisesti päivä- ja ilta-aikaan, jolloin lataustehoa on käytössä muutamia megawatteja. [80]



Kuva 39. Suuren kansallisen latausoperaattorin viikoittainen latausteho. [80]

Reservimarkkinoiden kannalta ongelmaksi muodostuu latausverkoston hajanaisuus, sillä esimerkiksi kyseisen toimijan tapauksessa latausteho muodostuu yli tuhannesta latauspistokkeesta ja erilaisia latauspaikkojakin on yli kaksisataa. Suurin osa latauspaikoista ottaa sähkönsä kiinteistön sähköliittymästä, jonka takia törmätään samaan ongelmaan tasevastuiden ylläpidosta, kuin taloyhtiöiden ja yritystenkin kanssa. Lisäksi varsinkin pikalatauspaikoilla asioivat latausasiakkaat eivät oletettavasti halua pitkittää pysähdystään ja karsia lataustehostaan ilman suurta korvausta latauksen hinnassa. Nopeammat taajuusohjatut reservimarkkinat soveltuvat julkisen liikenteen latauspisteille aFRR-markkinaa paremmin lyhyempien säätöaikojen ansiosta, jolloin asiakkaalle muodostuva latausajan pidentyminen ei nouse liian suureksi.

Julkisten latausasemien yhteyteen sijoitettavilla energiavarastoilla voitaisiin lisätä säätökapasiteettia suuremmilla latauskeskitymillä. Energiavarastoista purettavalla energialla voitaisiin ladata latauksessa olevia ajoneuvoja säätötoimenpiteiden aikana. Näin latausasiakas ei huomaa reservikäyttöä lataustapahtumassaan. Lisää energiavarastoista ja julkisesta latausverkostosta kappaleessa 5.7.

5.4 Ammattiliikenne

Ammattiliikenteen segmentti kasvaa tällä hetkellä kovaa vauhtia kuljetusyritysten sähköistäessään ajoneuvokalustoaan. Kasvu on nopeinta julkisessa liikenteessä ja etenkin kaupunkiliikenteessä sähköiset jakelu- ja linja-autot ovat erittäin kilpailukykyinen vaihtoehto dieselajoneuvoille. Ammattiliikenteen latauspaikat on toteutettu usein lataustavan 4 suurteholatureilla ja sähköisten ajoneuvojen määrästä riippuen varikkokohtaiset lataustehot ovat usein suuria yksityisautoiluun verrattuna. Tämän takia sähköisten linja-, kuorma- ja jakeluautojen latausvarikot sopivat ominaisuuksiensa puolesta lähtökohtaisesti hyvin reservikapasiteetin keräämiseksi. Suurien tehomäärien takia aggregoitavia yksiköitä tarvitaan vähemmän reservimarkkinoiden minimitarjouskoon täyttämiseksi,

mikä yksinkertaistaa reservimarkkinoille liittymistä ja alentaa liittymisestä aiheutuvaa vai-
vaa ja kustannuksia. Mitä vähemmän reserviresursseja on eri tasevastaavien taseesta,
sitä helpompaa reservikapasiteetin ylläpitäminen tasevastaavien vaihtuessa on.

Ammattiliikenteelle on erittäin tärkeää, että ajoneuvoissa on aina riittävästi energiaa
akustossa ajoneuvon seuraavaa ajosuoritetta varten. Ammattiliikenteen ja reservimark-
kinoiden yhdistämisessä täytyy varmistua, ettei säätökapasiteetti vaaranna ammattilii-
kenteen ajosuoritteita. Taajuusohjattujen reservimarkkinoiden aktivoitumisajat ovat
usein niin lyhyitä, että niiden aktivoituminen ei vaaranna ajoneuvojen tarvittavan ener-
giamäärän latautumista varikolla olon aikana. Taajuuden palautusreserveissä säätöajat
ovat puolestaan pidempiä ja jos kapasiteettia on myyty liikaa reservimarkkinoille, voi pa-
himmillaan ajoneuvon akun varaus jäädä liian pieneksi. Ammattiliikenteen latausvarikoi-
den liittämisestä reservimarkkinoille löytyy lisää kappaleesta 5.6.

5.5 Ansaintamallit Plugitille ja asiakkaalle

Reservimarkkinoilta saatavien korvausten jako voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla
riippuen, miten riskit Plugitin ja asiakkaan kesken halutaan jakaa. Reservimarkkinoille
osallistuminen vaatii aina uusia investointeja latausjärjestelmään, sillä nykyisillä lataus-
järjestelmillä ei voida suoraan reservimarkkinoille osallistua ja lisäksi reservimarkkinoilla
toimiminen vaatii jatkuvaa kommunikointia Fingridin suuntaan. Asiakas voi valita halu-
aako kantaa riskin reservimarkkinatuotoista täysin itse, antaa sen täysin Plugitille vai so-
vitaanko jokin kompromissi näiden väliltä. Kaikissa tilanteissa on tehtävä selkeä sopi-
mus, jolla sovitaan esimerkiksi kuinka paljon mahdollinen reservimarkkinakäyttö saa hi-
dastaa ajoneuvojen latautumista ja mikä osapuoli vastaa kaikista reservimarkkinoilla toi-
mimisen vaatimuksista. Oletetaan, että liittyminen reservimarkkinoille lähtee liikkeelle
Plugitin aloitteesta ja asiakkailta ei ole halukkuutta ruveta toimimaan itse reservitoimitta-
jana. Plugit toimii kaikissa vaihtoehtoissa aggregaattorina ja yhdistää latausjärjestelmän
(reserviresurssi) osaksi suurempaa reservikokonaisuutta (reservikohde). Seuraavaksi
on esitelty viisi erilaista vaihtoehtoa Plugitin ja asiakkaan ansaintamalleista.

1. Asiakas omistaa latausjärjestelmän, mutta Plugit operoi järjestelmällä reservi-
markkinoilla. Plugit investoi ja ylläpitää kyvykkyyttä toimia reservimarkkinoilla,
mutta samalla ottaa kaiken reservimarkkinatuoton. Asiakkaan saama hyöty re-
servimarkkinoista muodostuu Plugitin maksamasta kiinteästä korvauksesta la-
tausjärjestelmän käytöstä reservimarkkinoilla tai edullisempaan latausjärjestel-
män hankintahintana. Huomioitava ettei asiakkaan lataus häiriinny liikaa.

2. Asiakas omistaa latauslaitteiston ja haluaa kantaa riskin reservimarkkinoiden tuotoista itse. Asiakas maksaa kiinteää kuukausittaista korvausta Plugitille latausjärjestelmän muokkaamisesta reservimarkkinoille sopivaksi ja reservimarkkinoilla operoinnista. Asiakkaalle tuloutetaan latausjärjestelmän reservimarkkinoilta saama korvaus kokonaisuudessaan.
3. Plugit omistaa latausjärjestelmän ja myy esimerkiksi logistiikkayritykselle latausta palveluna (Plugitin CaaS -palvelumalli). Plugit investoi latausjärjestelmään ja vastaa latausjärjestelmästä kokonaisuutena. Asiakas hyötyy reservimarkkinoille osallistumisesta matalampana CaaS -palvelumaksuna ja Plugit saa reservimarkkinatuoton täysin itselleen. Huomioitava ettei asiakkaan lataus häiriinny liikaa.
4. Plugit omistaa latausjärjestelmän ja toimii itse latausoperaattorina. Plugit toimii ainoana osapuolena reservimarkkinoilla, joten kaikki vastuut ja korvaukset jäävät Plugitille. Plugit vastaa itse, miten reservimarkkinoilla toimiminen näkyy latausasiakkaiden latausnopeuksissa. Jos latausasemien yhteydessä on energiavarastot, voidaan lataustapahtumaa jatkaa keskeytyksettä reservin aktivoituessa, mutta ilman energiavarastoa on asiakkaiden ajoneuvojen lataustehojen tiputtava reservin ollessa aktivoituneena. Asiakkaan joudessa latausnopeudessa on se palkittava esimerkiksi edullisempaan latauksen hintana.
5. Asiakkaalla on kiinteistöllä muuta reservikapasiteettia ja asiakas haluaa liittää latausjärjestelmän osaksi suurempaa reservikokonaisuutta. Asiakas toimii itse reservitoimittajana ja järjestelmää ei aggregoida Plugitin reservikokonaisuuteen. Asiakas saa reservimarkkinoiden tuoton kokonaisuutena ja Plugit saa korvauksen latausjärjestelmän muokkaamisesta reservimarkkinalle sopivaksi.

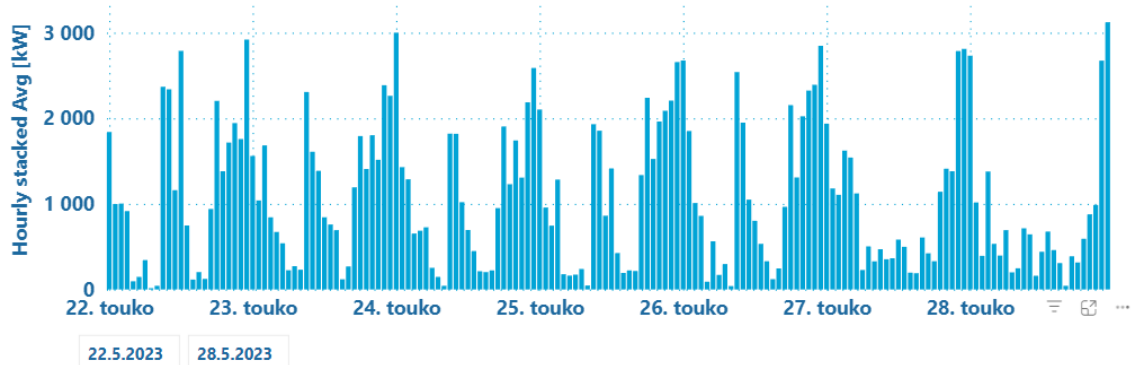
5.6 CASE: Suuri ammattiliikenteen asiakas

Plugit ylläpitää suuren ammattiliikenteen toimijan latausvarikoita ympäri Suomea. Seuraavassa kappaleessa tutkitaan olisiko toimijan latausvarikoiden avulla mahdollista osallistua FCR-D tai aFRR reservimarkkinoille.

5.6.1 Nykyinen latauskäyttäytyminen

Toimijan latausvarikoilla reservimarkkinoille osallistumiseksi tarvitaan tieto, kuinka paljon ajoneuvojen latauksessa on tällä hetkellä säätövaraa. Ajoneuvojen liikennöinti ei saa vaarantua reservimarkkinoille osallistumisen seurauksena, joten säätökapasiteetti pitää

mitoittaa niin, että ajoneuvot pystyvät silti latautumaan tarpeeksi ennen seuraavaa ajo-suoritetta. Toimijan käytössä olevien latausasemien yhteenlasketut tuntikohtaiset lataus-tehot vaihtelevat 0,1–3 MW välillä, joista suurimmat lataustehot painottuvat yleensä myö-häisiltään, sekä aamupäivän tunneille. Vastaavasti pienimmät lataustehot ovat usein ar-kipäivisin klo 06 ja 15 ympärillä, johtuen oletettavasti siitä, että niihin aikoihin liikennöinti on vilkkaimmillaan. Viikon tuntikohtaiset lataustehot näkyvät kuvassa 40.



Kuva 40. Ammattiliikenteen toimijan latausvarikoiden tuntikohtaiset lataustehot. [80]

5.6.2 Joustokapasiteetin määrän arviointi

Säätötarjouksen jättämiseksi aFRR- tai FCR-D-markkinoille vaadittiin vähintään 1 MW säätökapasiteetti. aFRR reservin tapauksessa kapasiteetti täytyy olla saman tasevas-taavan taseesta. Oletetaan, että toimijan sähköenergia on hankittu yhden tasevastaavan taseesta tai ne on ainakin mahdollista järjestää samaan taseeseen. Vuoden 2023 alusta toukokuun loppuun asti toimijan latausvarikkojen lataustehojen keskiarvot tunneittain nä-kyvät alla olevassa taulukossa 7. **Keltaisella** on merkitty tunnit, joiden latausteho on ollut keskimäärin yli 1 MW ja **vihreällä** tunnit, joiden latausteho on ollut yli 2 MW.

Taulukko 7 Asiakkaan latausvarikkojen tuntikohtaisten lataustehojen keskiarvoja 1.1.2023-31.5.2023. Muokattu lähteestä. [80]

Klo	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Ma	2524,4	1351,1	845,6	902,6	573,7	589,8	280,7	307,4	269,0	2327,5	1986,8	957,5	973,5	635,2	371,8	242,5	338,6	1075,2	1906,6	1499,7	1752,5	2031,7	2312,4	2490,6
Ti	2296,0	1617,9	1209,7	989,4	714,3	518,7	256,3	306,2	247,9	2424,9	2072,3	1139,4	980,7	782,6	367,9	193,7	352,3	1259,5	1982,2	1650,3	1796,4	1946,5	2431,6	2613,6
Ke	2395,8	1557,4	1001,3	1096,5	725,3	502,5	284,1	309,9	217,6	2443,5	2086,7	1093,6	899,4	622,6	269,2	206,6	340,5	1157,9	1874,0	1537,2	1689,6	1928,2	2508,0	2536,3
To	2477,6	1534,9	1011,8	1140,0	700,1	448,6	200,1	346,4	238,3	2260,1	1943,8	1091,1	920,4	708,5	283,1	283,7	307,3	1140,3	1837,5	1465,9	1648,7	2001,1	2401,6	2446,5
Pe	2436,8	1551,7	1172,8	979,2	666,6	518,2	232,2	133,2	274,0	2186,5	1983,3	842,6	992,5	465,3	400,5	191,9	303,8	1047,2	2003,5	1354,4	1828,0	2214,9	2360,5	2774,0
La	2289,6	1389,1	802,8	907,5	884,9	789,2	390,5	554,4	440,5	522,3	323,1	425,4	501,6	500,6	546,6	264,3	523,4	521,7	686,5	677,7	1542,7	1683,2	2321,2	2993,8
Su	2456,6	1308,2	792,6	1066,3	923,8	574,4	429,4	387,6	500,2	513,1	408,5	372,3	324,8	534,8	441,3	509,8	441,3	654,5	347,4	943,3	812,3	1404,5	2164,8	3090,6

Taulukosta nähdään suuntaa antavia tietoja toimijan latauskäyttäytymisestä ja pystytään arvioimaan millä tunneilla kysyntäjoustokapasiteettia olisi tarpeeksi käytettävissä. Yli 1 MW keskilataustehoja on keskimäärin 77 tunnin aikana ja näistä 32 tunnin aikana ka-pasiteettia olisi käytettävissä yli 2 MW. aFRR-markkinan ollessa suljettuna 01–05 piene-nee käytettävissä olevat tunnit 77 → 63. Lataustehojen keskihajonnan vaihdellessa n. 100–700 kW välillä ja yksittäisten tuntien vaihtelun ollessa tätä vielä paljon suurempia,

ei pelkästään latauksien keskiarvojen pohjalta voida luotettavasti ennustaa tulevia tunti-kohtaisia lataustehoja. Jotta säätökapasiteettia olisi varmasti riittävästi, tulee keskiha-jonta huomioida arvioita tehdessä. Varovaisella laskennalla voidaan kuvitella, että asi-akkaalla olisi 1 MW säädettävää kapasiteettia käytettävissä silloin, kun keskiarvotehot ovat yli 2 MW. Näin vältytään tilanteella, että reservimarkkinoille on tarjottu kapasiteettia, jota ei pystytä toimittamaan. Toimittamattomasta reservikapasiteetista joudutaan mak-samaan Fingridille sanktiota. Samalla mahdollistetaan pienehkö lataaminen, vaikka osa energiasta valjastettaisiin reservimarkkinoiden käyttöön.

5.6.3 Saatavilla olevat korvaukset

Saatavilla olevien korvausten suuruuden arvioimiseen käytetyt arvot on kerätty Fingridin avoimesta datasta. [67] Käyttämällä taulukon 7 mukaista käytettävissä olevaa kapasi-teettia ja pysyvyyttä, 1.1.2023 – 31.5.2023 toteutunutta aFRR-markkinoinen keskimää-räistä ylössäätökapasiteetin marginaalihintaa, sekä kohdassa 3.9.2 esitettyä kaavaa saadaan laskettua arvio vuosituotosta.

Vuosituotto (€) = hyväksytyt reservikapasiteetti (MW) * reservistä maksetun korvauksen keskihinta (€/MW,h) * vuositason käytettävissä olevat säätötunnit eli pysyvyys (h)

Käytettävissä oleva kapasiteetti olisi tässä tilanteessa 1 MW ja viikoittainen pysyvyys 32 tuntia. Ylössäätökapasiteetin marginaalihinta on vaihdellut valitulla ajanjaksolla 16–129,1 €/MW välillä ollen keskiarvoisesti 35,49 €/MW. Oletetaan, että latausoperaattorin tuoma lisäkapasiteetti reservimarkkinoille, ei laske merkittävästi reservikapasiteetista maksettavaa korvausta. Tuntikohtaiset kapasiteettikorvaukset on esitetty taulukossa 8. Taulukossa arvojen väri muuttuu vihreästä liukuvasti punaiseksi korvauksen pienenty-essä. Tutkimalla kapasiteettikorvauksen keskiarvoja tunneittain huomataan, että ne eivät merkittävästi poikkeaa keskiarvosta niillä tunneilla, joilla latausvarikoilla olisi eniten kapa-siteettia käytettävissä. Näiden 32 viikoittaisen tunnin kapasiteettikorvaus on keskimäärin 35,9 €/MW, joka on hyvin lähellä koko aikavälin keskiarvoa. Taulukosta voidaan kuiten-kin huomata, että suurimmat kapasiteettikorvaukset saadaan arkipäivisin klo 7–11.

Taulukko 8 aFRR tuntikohtaisten kapasiteettikorvausten keskiarvot €/MW aikavä-lillä 1.1.2023-30.6.2023. Muokattu lähteestä. [67]

Klo	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Ma	31,3	31,1	20,3	0,0	0,0	0,0	16,6	42,8	43,1	47,0	43,4	35,8	34,7	33,5	33,1	32,7	33,1	33,8	34,7	34,4	34,2	33,6	31,8	31,5
Ti	30,9	31,9	19,4	0,0	0,0	0,0	15,4	42,8	44,8	52,3	44,8	37,6	37,4	36,7	34,5	34,9	35,8	34,9	36,4	37,8	38,7	38,9	34,2	32,3
Ke	31,9	34,0	18,4	0,0	0,0	0,0	19,2	45,9	47,4	48,7	44,1	38,3	36,8	33,1	33,3	33,9	35,0	35,4	35,6	38,9	40,0	41,3	35,4	32,5
To	31,6	31,4	19,1	0,0	0,0	0,0	18,4	47,6	48,0	49,2	42,1	36,4	36,1	32,3	32,5	32,6	33,8	34,8	36,5	37,7	40,4	42,3	35,7	33,3
Pe	33,7	31,3	16,6	0,0	0,0	0,0	18,4	41,5	43,3	45,7	41,2	35,1	32,6	32,1	31,9	32,1	32,8	32,8	32,8	35,6	34,9	34,3	31,7	29,6
La	29,8	30,7	17,3	0,0	0,0	0,0	13,3	33,8	33,7	34,1	32,1	31,1	31,1	31,2	31,6	31,8	31,9	31,7	32,3	32,1	32,9	33,1	30,9	29,2
Su	32,0	33,3	20,5	0,0	0,0	0,0	13,3	34,3	34,3	34,4	33,5	32,4	32,1	32,1	32,6	33,3	33,2	33,6	34,8	33,3	32,4	33,8	30,9	30,2

Vuosituoton arviointiin on tässä käytetty koko aikavälin keskiarvoa, jolloin vuosituottoarvio muodostuu seuraavalla kaavalla:

$$\text{Vuosituotto (€)} = 1 \text{ MW} * 32 \text{ h} * 52 \text{ viikkoa} * 35,49 \text{ €/MW} = \mathbf{59\ 055 \text{ €}}$$

Kapasiteettikorvaus maksetaan, vaikka kapasiteettia ei aktivoitaisi käyttöön laisinkaan. Kapasiteettikorvauksen lisäksi aktivoidusta energiasta maksetaan sen hetkisen ylössäätöhinnan mukainen korvaus, joka on vähintään Suomen aluehinnan suuruisen. Energiakorvaus maksetaan, jos hyväksytyt kapasiteettitarjous aktivoidaan. Aktivointi tapahtuu tarjouskokojen suhteessa, joten on vaikea arvioida kuinka useasti 1 MW kapasiteetti aktivoitaisiin, mutta oletetaan tässä sen tapahtuvan keskimäärin joka kolmannella hyväksytyllä kapasiteettitunnilla. Energiakorvauksen yhteydessä on hyvä huomioida, että energiakorvaus maksetaan käyttämättömästä energiasta, jonka avulla voidaan ladata joustettu energia myöhemmin takaisin. Mitä korkeampi on sen hetkinen yleinen sähkön hinta, sitä korkeampi on saatu energiakorvaus. Vuoden 2023 ensimmäisen vuosipuoliskon ylössäätöhinnan keskiarvo on ollut 71,76 €/MWh, joten arvio reservin energiakorvauksesta saadaan seuraavalla kaavalla.

$$\text{Korvaus joustetusta energiasta (€)} = 1 \text{ MW} * 32 \text{ h} * 52 \text{ viikkoa} * 71,76 \text{ €/MWh} * 1/3 = \mathbf{39\ 803 \text{ €}}$$

Arvio vuositason kokonaistuotosta aFRR-markkinapaikalta olisi yhteensä siis **98 857 €** laskennassa käytettävien oletusten pohjalta. Automaattisen palautusreservin aktivointisignaali ja muu kommunikointi tapahtuu fyysisesti FEN-verkossa, johon Plugitilla ei ole taloudellisesti järkevä liittyä itse. Kommunikoinnin ulkoistaminen palveluntarjoajalle kustantaa arviolta n. 1000 €/kk, joka on suoraan pois saatavista tuotoista. Karkeasti laskien vuosikorvaus yhteistyökumppanin kulut huomioiden olisi siis noin **86 000 €**.

Siirryttäessä aFRR markkinalta FCR-D ylössäätömarkkinoille vastaavilla resursseilla olisi saatavilla samalla kapasiteetilla seuraavassa lasketut vuosituotot. Tuotto on laskettu vuoden 2023 ensimmäisen vuosipuoliskon keskimääräisellä taajuusohjatun häiriöreservin hinnalla tuntimarkkinoilta, joka on ollut 22 €/MW.

$$\text{Vuosituotto (€)} = 1 \text{ MW} * 32 \text{ h} * 52 \text{ viikkoa} * 22 \text{ €/MW} = \mathbf{36\ 608 \text{ €}}$$

Tuntikohtaiset kapasiteettikorvaukset FCR-D reservistä on esitetty taulukossa 9. Taulukossa arvojen väri muuttuu **vihreästä** liukuvasti **punaiseksi** korvauksen pienentyessä. Vertaamalla taulukkoa 7 ja taulukkoa 9 keskenään huomataan, että latausvarikoiden kapasiteetti on käytettävissä suurimpien kapasiteettikorvauksien ajankohtien kanssa. FCR-

D kapasiteettikorvauksen keskiarvo latausvarikoiden käytettävissä olevilla tunneilla on 31,1 €/MW, mikä on selkeästi korkeampi korvaus, mitä edellä lasketussa kaavassa on käytetty.

Taulukko 9 FCR-D tuntikohtaisten kapasiteettikorvausten keskiarvot €/MW aikavälillä 1.1.2023-30.6.2023. Muokattu lähteestä [67]

Klo	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Ma	31,9	30,3	24,5	21,0	12,3	10,1	8,1	9,1	15,6	24,6	28,3	24,7	27,9	28,4	22,1	22,2	17,7	18,4	19,1	23,9	37,7	38,0	32,1	30,6
Ti	28,6	37,6	34,6	30,2	14,4	10,4	4,9	14,7	24,0	42,6	48,7	22,4	27,2	26,4	18,9	17,5	19,3	19,1	21,8	31,3	36,9	38,1	34,3	25,5
Ke	21,4	24,4	20,5	15,9	6,1	4,6	3,8	5,3	16,1	33,7	30,7	25,2	26,3	24,5	16,8	19,1	14,5	16,8	19,1	22,1	30,4	28,3	31,3	28,3
To	23,3	24,0	18,6	12,2	6,3	5,8	3,5	3,4	11,7	22,3	28,3	26,0	28,3	21,1	16,7	14,7	18,0	21,3	24,5	41,7	43,7	34,0	43,1	31,1
Pe	24,7	28,0	28,4	19,3	9,7	7,0	10,2	12,9	15,6	17,6	19,4	16,7	16,9	17,8	16,5	16,9	17,7	20,3	24,0	28,6	30,5	31,1	38,1	43,8
La	40,1	30,1	28,3	20,3	11,1	9,7	8,3	11,6	14,7	19,6	21,5	19,1	18,5	19,6	21,6	22,5	17,8	17,0	16,5	18,1	23,7	20,6	26,0	25,8
Su	22,0	25,3	24,0	18,0	19,8	16,0	15,1	15,8	11,0	14,7	19,6	18,4	13,0	18,6	20,1	13,8	21,9	18,2	17,6	19,2	20,3	20,3	33,0	31,6

Laskemalla vuosituotto uudestaan päivitetyllä kapasiteettikorvauksella päädytään seuraavaan vuosituottoon.

$$\text{Vuosituotto (€)} = 1 \text{ MW} * 32 \text{ h} * 52 \text{ viikkoa} * 31,1 \text{ €/MW} = 51 \text{ 750 €}$$

Taajuusohjatun häiriöreservin ylläpidosta saatavat korvaukset latausvarikoiden tapauksessa ovat siis samansuuruisia kuin aFRR-reservistä saatava kapasiteettikorvaus, mutta häiriöreservin lyhyemmät säätöajat häiritsisivät lataustapahtumaa merkittävästi vähemmän. Lisäksi FCR-D markkinalle voidaan osallistua ilman yhteistyökumppania, sillä kommunikointi Fingridin kanssa voidaan toteuttaa web-pohjaisesti ilman FEN-verkkoa, mikä osaltaan yksinkertaistaa osallistumista ja pienentää kustannuksia.

5.6.4 Vaatimukset osallistumiselle

Suurimmat vaatimukset reservimarkkinoille liittymisestä muodostuvat reaaliaikaisen tiedonsiirron toteuttamisesta ja reservin aktivoinnin rakentamisesta. Reservimarkkinoiden vaatimuksia säätökokeiden, mittausvaatimusten ja tiedonsiirron osalta on kuvattu kapaleessa 4.3.

Reservikapasiteetin aktivoimisen toteutus riippuu paljon osallistuttavan reservimarkkinan vaatimuksista. FCR-D reservissä aktivoitumisen nopeusvaatimukset ovat niin kovia, että reservin aktivoiminen verkkoyhteyden yli ei käytännössä ole mahdollista. Komentojen kulkeutumisessa eri servereiden ja verkkojen kautta voi kestää useita sekunteja, joten mittaus ja ohjaus on toteutettava paikallisesti. Latausjärjestelmien paikalliseen ohjausjärjestelmään on rakennettava taajuudesta riippuvainen pakko-ohjaus, joka laskee lataustehoja taajuuden tippuessa normaalin taajuuden vaihteluvälin ulkopuolelle. Paikallisen ohjauksen rakentaminen vaatii latausvarikkojen latauskeskukselle tai muualle alueelle sijoitettavan taajuus- ja tehomittarin asentamisen. Mittalaitteilta saatavien tietojen

avulla voidaan paikalliselle tietokoneelle tehdä ohjelma, jonka avulla lataustehoja pienennetään taajuuden muutoksen seurauksena. Ohjaus pyörii paikallisesti, mutta päivitykset järjestelmään voidaan tehdä verkkoyhteyden ylitse.

Reaaliaikainen tiedonsiirto vaatii 60 sekunnin tiedonvaihtosyklin ja voidaan toteuttaa verkkoyhteydellä IEC 60870-5-104 –protokollan avulla. Reservikohteiden historiatietojen kerääminen voidaan toteuttaa paikallisesti ja lähettää verkkoyhteydellä pilvipalveluun talteen esimerkiksi kerran vuorokaudessa. Reaaliaikaisesta tiedonsiirrosta lisää kappaaleessa 4.3.3 ja liitteissä A ja B. Mitään teknistä estettä FCR-D reservimarkkinalle osallistumiseksi ei pitäisi olla, mutta käytännön testit ovat vielä tekemättä.

Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivointi-aika on sen verran hitaampi kuin FCR-D:n tapauksessa, että se voidaan toteuttaa verkkoyhteyden yli. Muuten toteutus onnistuu hyvin samankaltaisesti kuin aFRR-reservissä huomioiden, että tiedot kulkevat FEN-verkkoon yhteistyökumppanin kautta. Yhteistyökumppanin kautta kulkevat komennot nostavat hiukan vaatimuksia aktivoitumisen ja tiedonsiirron osalta, sillä yhteistyökumppanin kautta kulkevilla viesteillä on aina pieni viive. Mitään teknistä estettä aFRR-markkinalle osallistumiselle ei pitäisi olla.

5.7 CASE: Raskaan liikenteen julkinen latausverkosto

Plugit on rakentamassa noin 20–30 latausaseman sisältävän julkisen raskaan liikenteen latausverkon eri puolelle Suomea. Ensimmäisen latausaseman on tarkoitus valmistua Tampereen Viinikkaan syksyllä 2023. Ensimmäisen latausaseman yhteyteen sijoitetaan suurehko energiavarasto ja energiavarastoja voidaan sijoittaa tulevienkin latausasemien yhteyteen, jos se katsotaan kannattavaksi. [81] Ensimmäisen latausaseman rakentaminen on käynnissä, mutta yhtään toiminnassa olevaa latausasemaa ei ole vielä valmiina, joten esitettävät luvut perustuvat täysin arvioihin. Oletetaan tässä vaiheessa, että latausasemia on tulossa 20 kappaletta, energiavarastojen teho ja energiasisältö on 0,5 MW ja 0,5 MWh ja kaikki kapasiteetti voidaan syöttää tarvittaessa verkkoon. Latausasemat toteutetaan Plugitin omilla HUBE PRO DC -latausratkaisuilla.

5.7.1 Latausasemien käyttö ja ominaisuudet

Latausasemat tulevat toimimaan varausperiaatteella, eli latauspisteeltä varataan latausvuoro etukäteen. Alussa käyttöasteet ovat luultavasti matalat, mutta sähköisten ajoneuvojen yleistyessä käyttöaste kasvaa varmasti nopeasti tulevina vuosina. Latausasemat voidaan varustaa energiavarastoilla, joiden käyttöä voidaan kohdistaa sinne, mistä suu-

rin lisäarvo latausasemalla saadaan. Käyttökohteita energiavarastoille voi olla esimerkiksi huipputehojen pienentäminen verkosta ostettavan sähkön osalta, sähkökatkon aikaisen lataamisen mahdollistaminen, lataussähkön hinnan optimointi tai esimerkiksi reservimarkkinoille osallistuminen. Energiavarastoilla varustetut latausasemat varustetaan verkkoon syöttävillä inverttereillä, jotka mahdollistavat akuston energian purkamisen verkkoon päin. Julkiselle pikalatausasemalle tuleva ammattiliikenteen asiakas haluaa minimoida latauspaikalla vietetyn ajan, joten reservimarkkinoille osallistuminen lataustehoa pienentämällä ei ole isossa kuvassa mahdollista. Näin ollen ainoastaan energiavarastojen kapasiteetti olisi reservimarkkinoiden käytettävissä.

Energiavarastojen avulla latausasemilla olisi mahdollista osallistua taajuusohjatuille reservimarkkinoille, sillä akustoista pystytään purkamaan tehoa erittäin nopeasti verkkoon päin riippuen järjestelmän inverttereiden reagoitajajoista. Nopeimman reservimarkkinan (FFR) nopeuksiin ei käytännössä päästä inverttereiden käynnistysnopeuksien takia, mutta FCR-D-markkinapaikalle, jossa reagoitinopeudet ovat sekuntiluokassa osallistuminen pitäisi onnistua. FCR-D reserviltä vaaditaan nopeaa reagointia muuttuneeseen taajuuteen, mutta toisaalta taajuushäiriöiden kestot ovat yleensä hyvin lyhyitä muutamista sekunneista muutamiin minuutteihin. Korvaus maksetaan ylläpidetystä kapasiteetista ja reservikäytön energia on merkittävästi pienempää kuin esimerkiksi aFFR reservituotteen kanssa. Osallistumisen edellytyksenä on sekunneissa toimiva reagointi taajuuden muutoksiin, joten osallistuminen vaatii paikallisen ohjauksen, joka siirtäisi kuluksen verkosta akustoille taajuusmittarin signaalin mukaan.

Energiavarastojen avulla voidaan latausasemien alun matalaa käyttöastetta korvata käyttämällä akustoja reservimarkkinoilla saaden lisätuottoja taajuuden ylläpidosta. Käyttöasteiden kasvaessa akustojen hyödyntämistä voidaan siirtää reservimarkkinoilta esimerkiksi mahdollistamaan suuremman määrän latauspisteitä nykyisellä verkkoliitännällä tai lataamalla akustoja alhaisten energiahintojen aikana ja purkamalla akustoja korkeiden hintojen aikana. Akustoa voidaan käyttää eri toimintoihin sen mukaan mikä milläkin ajanhetkellä on kannattavinta, sillä seuraavan päivän reservikorvaukset ja sähkön hinnat julkaistaan edellisen vuorokauden aikana. Korkeiden reservistä maksettavien korvausten aikana akustoa voitaisiin käyttää reservikapasiteettina, mutta jos rajahinnalla määriteltyä reservitarjoustusta ei hyväksytä markkinalle, voidaan akustoa käyttää latausenergian hinnan optimointiin.

5.7.2 Saatavilla olevat korvaukset

Energiavarastojen avulla on mahdollista osallistua FCR-D ylössäätömarkkinalle ja aFRR ylössäätömarkkinalle. Osallistuminen FFR markkinalle ei lähtökohtaisesti onnistu erittäin nopeiden reagointivaatimusten takia, mutta markkina on otettu silti laskelmiin mukaan. Lasketaan saatavilla olevat tuotot eri markkinapaikoille seuraavasti:

Vuosituotto (€) = hyväksytyt reservikapasiteetti (MW) * reservistä maksetun korvauksen keskihinta (€/MW,h) * vuositason käytettävissä olevat säätötunnit eli pysyvyys (h) * latausosuuksien määrä (kpl).

Reservikapasiteetti määräytyy säädettävissä olevan tehon perusteella. Käytännössä se riippuu käytössä olevasta invertteristä, jolla energiavaraston kapasiteettia voidaan purkaa verkostoon tai latauslaitteistolle ja akuston purkutehosta. Invertteri on oletettu näissä laskelmissa 500 kW tehoiseksi. Reservistä maksetun korvauksen suuruus riippuu aina sen hetkisestä markkinatilanteesta, mutta näissä laskelmissa käytetään hyväksi aikavälin 1.1.2023 – 30.6.2023 toteutuneita keskihintoja. Laskelmissa oletetaan, että latausoperaattorin reservimarkkinatarjous hyväksytään jokaiselle kaupankäynnin kohteena olevalle tunnille, joten laskuissa voidaan käyttää keskiarvoa.

Rajoitettua aktivointikykyä reservikohteilla kuten energiavarastoilla on vähimmäismitoitukset yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille. Nopean taajuusreservin kohdalla vähimmäismitoitus täydellä kapasiteetilla on 5–30 s, taajuusohjatun häiriöreservin kohdalla 20 min ja automaattisen taajuuden palautusreservin kohdalla 1 h. Akustosta, jonka energiasisältö on 500 kWh ja sitä puretaan 500 kW teholla, riittää kapasiteettia yhdeksi tunniksi. Mitä lyhyempi aika reservin vähimmäismitoitus on, sitä pienemmällä akuston koolla tai varauksella voidaan reservimarkkinalle osallistua. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että akuston kapasiteetista (500 kWh) pitää olla jäljellä nopeassa taajuusreservissä 1 %, taajuusohjatussa häiriöreservissä 34 % ja automaattisessa taajuuden palautusreservissä 100 %, jotta kyseisen reservimarkkinan vähimmäismitoitus täyttyy. Automaattisen taajuuden palautusreservin kohdalla akusto pitäisi pystyä lataamaan käytetyn tunnin jälkeen uudestaan täyteen vähimmäismitoituksen täyttämiseksi, joten teoriassakaan ei kapasiteettia olisi osallistua täydellä kapasiteetilla markkinoille kuin vain joka toiselle tunnille. FFR ja FCR-D markkinoille voidaan osallistua käytännössä jokaiselle markkinoilla olevalle tunnille. FFR- markkinoilla vuosittaiset tuntimäärät ovat n. 1500, mutta määrien ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa järjestelmän inertian pienentyessä entisestään. FCR-D ylössäätömarkkinoilta on ostettu tuntimarkkinakapasiteettia viime vuosina noin

8300 tuntia vuodessa eli suurimmalta osalta vuoden tunneista. aFRR ylössäätömarkkinalta ostetaan kapasiteettia kasvavissa määrin, mutta viime vuosina määrä on ollut noin 20 tuntia vuorokaudesta eli 7300 tuntia vuodessa.

Reservimarkkinoilta saatavilla olevat kapasiteettitulot on esitetty alla olevassa taulukossa 10.

Taulukko 10 Reservimarkkinoilta saatavat kapasiteettitulot raskaan liikenteen latausverkostolla

Markkina	Latausasemien määrä	Akuston koko/teho	Kyvykkyyks	Tuntimarkkinoiden koko	Keskihinta	Kapasiteettitulo
FFR	20 kpl	0,5 MWh / MW	100,00 %	1500 h/vuosi	37 €/MW	555,0 k€
FCR-D Y	20 kpl	0,5 MWh / MW	100,00 %	8300 h/vuosi	22 €/MW	1826,0 k€
aFRR	20 kpl	0,5 MWh / MW	50,00 %	7300 h/vuosi	35 €/MW	1277,5 k€

Taulukosta huomataan, että suurimmat tuotot kapasiteettimarkkinoilta saadaan FCR-D markkinalta. Kapasiteettitulon lisäksi aFRR-markkinalta maksetaan korvausta säädetyistä energiasta säätömarkkinoiden ylössäätöhinnan mukaan. Oletetaan että joka kolmas kapasiteettimarkkinoille tarjottu tunti aktivoituisi, jolloin energiasta saatava korvaus muodostuisi seuraavasti:

Korvaus joustetusta energiasta (€) = $10 \text{ MW} * 0,5 * 7300 \text{ h} * 72 \text{ €/MWh} * 1/3 = 876 \text{ k€}$

Yhteensä reservimarkkinoilta saatavat tulot on esitetty alla olevassa taulukossa 11. Taulukosta huomataan, että energiakorvauksen myötä aFRR markkinan tuotot nousisivat suurimmiksi, mutta koska aktivointien määrää on hyvin vaikea arvailla etukäteen voi energiakorvauksen suuruus jäädä hyvin kauas edellä lasketusta.

Taulukko 11 Reservimarkkinoilta saatavat tulot

Markkina	Kapasiteettitulo	Energiatulo	Yhteensä
FFR	555,0 k€	0 k€	555,0 k€
FCR-D Y	1826,0 k€	0 k€	1826,0 k€
aFRR	1277,5 k€	876,0 k€	2153,5 k€

Eri reservimarkkinoilta saatavia tuottoja vertaillen on hyvä huomioida akuston kuormittuminen reservimarkkinoiden ylläpidosta. Nopeammin reagoivilla reservituotteilla akustoon syntyy vähemmän akuston kestoja heikentäviä lataussyklejä, kun akustosta ei puureta energiaa kuin lyhyitä aikoja. Edellä mainittujen tuottojen saaminen aFRR-markkinalta on vaatinut tässä esimerkissä vuositasolla 1216 täyttä lataussykliä olettaen, että reservikapasiteettia on tarjottu joka toiselle mahdolliselle tunnille ja näistä joka kolman-

nella tunnilla reservi on aktivoitunut täysin kyseiseksi tunniksi. Tällaiset syklimäärät raskastavat akustoa niin paljon, että akusto menettää kapasiteettinsa muutamassa vuodessa. Vertailun vuoksi FCR-D reservi aktivoituu vuositason yhteensä n. 4600 minuutin ajan, joka tarkoittaisi 0,5 MW/MWh akustolle täydellä säätökapasiteetilla n. 75 sykliä vuodessa. FCR-D ylös -markkinalla aktivoitua kapasiteettiä on kuitenkin verrannollinen taajuuspoikkeaman määrään ja säätökapasiteetti aktivoituu yli 50 % teholla vain muutamien yksittäisten minuuttien ajan vuodessa. Lataussyklien lukumäärä vuositason jäisi todellisuudessa siis murto-osaan edellä lasketusta 75 syklistä, mutta sitä voidaan pitää parhaimpana mahdollisena tapauksena. Näin ollen FCR-D markkina soveltuu pienemmistä korvauksista huolimatta paremmin akustoihin pohjautuvalle reservikohteille.

Parhaimpiin kokonaistuottoihin akustoilla varustetulla latauspaikalla päästään tilanteissa, joissa reservimarkkinoille osallistutaan ainoastaan silloin kun reservistä maksettava korvaus on kohtuullinen ja muuna aikana akustoa voidaan käyttää muuhun kannattavaan liiketoimintaan. Tässä tapauksessa akustoa voitaisiin käyttää esimerkiksi sähkön hankintahinnan alentamiseen lataamalla akusto aina edullisen sähkön hinnan aikana ja purkamalla latausjärjestelmään silloin kun sähkön hinta on suurimmillaan. Latausjärjestelmän käyttöasteen ollessa matala, voidaan edullisesti ladattua sähköä purkaa akustosta myös verkkoon päin ja hyödyntämällä sähkön hintavaihteluita tuoton tekemiseen.

5.7.3 Vaatimukset osallistumiselle

Raskaan liikenteen latausverkoston osallistumiselle reservimarkkinoille koskee samat vaatimukset, mitä kappaleessa 5.6.4 on käyty läpi asiakkaan suuren latausvarikoiden osalta. Ainoat eroavaisuudet muodostuvat siitä, että latausvarikoiden tapauksessa osallistuminen perustuu täysin kysyntäjoustoon ja latauksessa käytettävien tehomodulien säätämiseen. Akustoilla varustetun latausaseman tapauksessa reservimarkkinoille osallistuminen tapahtuu purkamalla tehoa akustosta invertterien välityksellä verkkoon.

Reservimarkkinoille osallistumisen näkökulmasta eroavaisuudella ei ole merkitystä. Mitään teknistä estettä reservimarkkinoille osallistumiseksi ei pitäisi olla, mutta käytännön testit ovat vielä tekemättä, sillä akustoilla varustettu latausjärjestelmä ei valmistunut tämän työn määräaikaan mennessä. Tässä vaiheessa ainoa asia, joka reservimarkkinoiden takia täytyy järjestelmässä ottaa huomioon, on riittävän tarkan taajuusmittauksen järjestäminen järjestelmän yhteyteen, mutta sekin voidaan tarvittaessa lisätä järjestelmään myöhemmin.

Tarkempia testejä pääsee tekemään syksyn 2023 aikana, kun ensimmäinen järjestelmä valmistuu. Käytännön testeillä varmistetaan järjestelmän aktivointinopeuden ja stabiiliuden riittävyys valitulle reservimarkkinalle. Samanaikaisesti voidaan muokata ohjausjärjestelmä vastaamaan reservimarkkinoiden tarpeita. Kun järjestelmä on täysin valmis ja täyttää diplomityön kappaleessa 4.3 esitetyt reservikohteen vaatimukset, voidaan Fingridin säätökokeet suorittaa ja edetä kuvan 25 mukaisesti reservimarkkinoille osallistumisen prosessi loppuun.

6. RESERVIMARKKINOIDEN MAHDOLLISUUDET TULEVAISUUDESSA

Tämän kappaleen tarkoituksena on arvioida miten Plugitin mahdollisuudet reservimarkkinoilla toimimisesta voivat muuttua erilaisissa tulevaisuuden skenaarioissa. Tulevaisuuden ennustaminen on aina haastavaa ja näitä arvioita ei tule mieltää faktoina.

6.1 Latausverkon laajentuessa

Ajoneuvokannan sähköistymisen jatkuminen näyttää tällä hetkellä varmalta. Samalla reservikapasiteetiksi kelpaavan latauskapasiteetin voi olettaa kasvavan. Niin kun kappaleissa 5.1 ja 5.2 todetaan, nykyisellään taloyhtiöiden ja yritysten latauskapasiteettia on hyvin vaikea yhdistää reservimarkkinoille tasevastuiden manuaalisen selvittämisen takia. Tilanne ei muutu, vaikka kapasiteetti kasvaisi merkittävästikin. Suurien ammattiliikenteeseen tarkoitettujen latausvarikkojen määrä kasvaa kuitenkin myös voimakkaasti ja näiden varikkojen liittäminen reservimarkkinoille on paljon kustannustehokkaampaa ja helpompaa kuten kappaleessa 5.4 on todettu. Plugitin ja reservimarkkinoiden kannalta yksinkertaisinta olisi, jos yhden asiakkaan latausvarikkojen määrä kasvaa esimerkiksi viidestä kymmeneen, jolloin todennäköisyys järjestelmien ja latauskäyttäytymisen samankaltaisuudelle on suurempi kuin tilanteessa, jossa viisi latausvarikkoa rakennetaan viidelle eri toimijalle. Samalla on todennäköisempää, että latausvarikkojen sähkö on saman tasevastaavan taseesta.

Plugitin toimiessa reservimarkkinoiden itsenäisenä aggregaattorina, suurempi määrä reserviresursseja mahdollistaa suuremman reservikapasiteetin ja pysyvyyden ylläpitämisen reservimarkkinoilla, mikä johtaa absoluuttisesti suurempiin reservimarkkinatuottoihin. Käytössä olevaan reservikohteeseen uuden reserviresurssin liittäminen vaatii säätökokeiden suorittamisen joko lisättävän resurssin tai uuden muodostuneen kokonaisuuden osalta. Reservimarkkinoilla toimimisen aloittamisen jälkeen lisäkapasiteetin lisääminen on suhteellisen yksinkertaista, kun reservimarkkinoille soveltuva taustajärjestelmä on valmis ja käytänteet reservimarkkinoilla toimimiseksi tuttuja.

6.2 Tasevastuiden ylläpidon automatisoituminen

Pienien lataustehojen aggregointi reservikohteeksi on ongelmallista, sillä reservikäytöstä tulee aina ilmoittaa reserviresurssin tasevastaavalle ja tasevastaavan vaihtuessa tulee

muutoksesta ilmoittaa Fingridille kirjallisella ilmoituksella viimeistään 14 vuorokautta ennen tasevastaavan vaihtumista. Tämä manuaalinen prosessi tekee pienien lataustehojen liittämisen reservimarkkinoille käytännössä mahdottomaksi, sillä mahdollisia tasevastaavien vaihdoksia voi tulla todella paljon esimerkiksi taloyhtiöiden sähkösopimusten kilpailutuksen yhteydessä.

Jos reservikohteen tasevastaavan vaihtuessa asiasta välittyisi automaattisesti tieto Fingridille ja uudelle tasevastaavalle, helpottuisi pienempien kokonaisuuksien aggregointi merkittävästi FFR ja FCR-D markkinoille, joissa reservikohde voi muodostua useamman tasevastaavan taseesta löytyvistä resursseista. Tämänkaltaisen päivityksen jälkeen esimerkiksi taloyhtiöiden latausjärjestelmät voitaisiin aggregoida helpommin reservimarkkinoille.

6.3 Kaksisuuntainen lataus

Kuten kappaleessa 2.4 todettiin, V2G tai V2H ratkaisuja ei juurikaan Suomessa vielä ole käytössä, mutta tulevaisuudessa kun kaksisuuntaista latausta tukevien ajoneuvojen ja latausasemien määrä kasvaa, tulee se yleistymään merkittävästi. Vielä eurooppalainen CCS-latausstandardi eikä OCPP 1.6 -kommunikointiprotokolla tue virallisesti kaksisuuntaista latausta. Suurimmat hyödyt kaksisuuntaisesta latauksesta tulee näkymään omakotitalo- tai mökkikiinteistöjen omistajilla, jotka haluavat optimoida sähkön hankintakustannuksia tai oman uusiutuvan sähköntuotannon hyödyntämistä.

Kaksisuuntaista latausta on mahdollista hyödyntää myös reservimarkkinoilla, jolloin ajoneuvojen akustoista saataisiin lisäkapasiteettia lataustehon pienentämisen lisäksi. Nykyisillä reservimarkkinasäännöillä yksittäisten kuluttajien kaksisuuntaisten latausasemien aggregointi reservimarkkinoille törmää samoihin ongelmiin taseselvityksen tekemisen suhteen kuin muutkin pienemmät latauskohteet. Suurilla latausvarikoilla ja kiinteistöillä, joilla on ennestään muutakin reservikapasiteettia, voidaan kaksisuuntaisella latauksella kasvattaa reservikapasiteetin suuruutta.

Kaksisuuntainen lataus voi yleistyä nopeasti reservimarkkinoilla, jos esimerkiksi EU-tasolla tehdään päätös, että ajoneuvojen on osallistuttava sähköverkon tuentaan. Esimerkiksi Japanissa, jossa Fukushiman ydinvoimalaitoksen onnettomuus aiheutti suuren sähköjärjestelmän häiriön, on ajoneuvojen kyettävä tukemaan tarvittaessa kansallista sähköjärjestelmää. Tämän seurauksena japanilaiset ajoneuvot kuten Nissan ja Mitsubishi Chademo-liitännällä tukevat lähtökohtaisesti kaksisuuntaista latausta.

Ongelmaksi kaksisuuntaisessa latauksessa asiakkaan suunnalta muodostuu akun keskeisyys ja pelko riittävästä ajoneuvon toimintamatkasta. Akuston toistuva lataaminen ja purkaminen kuormittaa akustoa ja vaikuttaa negatiivisesti akun elinkaareen, mikä laskee vuorostaan ajoneuvon arvoa. Ajoneuvon akun käyttämisestä sähköverkon taajuuden ylläpitämiseen tulisi saada asianmukainen korvaus, jotta ajoneuvon omistaja siihen suostuisi. Yksi mahdollinen liiketoimintamalli kaksisuuntaisella latauksella voisi olla tilanne, jossa asiakas saisi latausasemalta ladattua ajoneuvoa ilmaiseksi tai pörssihinnalla ja operaattori saisi korvauksen reservimarkkinakapasiteetin ylläpidosta. Ajoneuvosta verkkoon ladattavan energian määrä tulisi myös pystyä rajaamaan jotenkin, jotta ajoneuvon toimintamatka pysyy aina riittävällä tasolla.

6.4 Muutokset reservimäärissä tai hinnassa

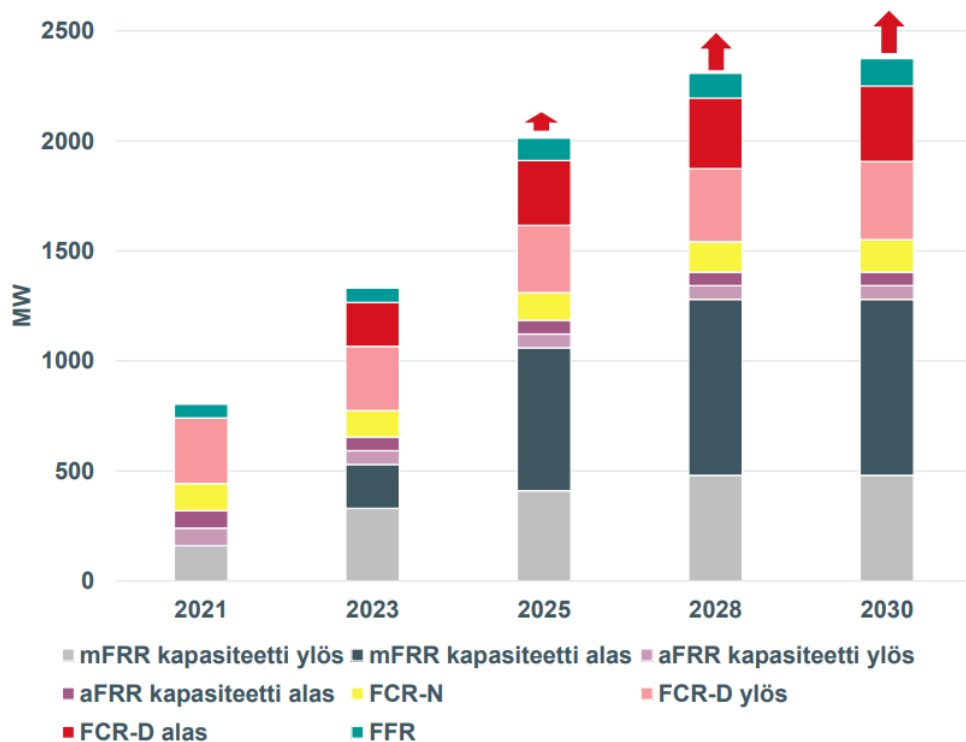
Tämän diplomityön reservimarkkinoista saatavien tuottojen arviointiin on käytetty FCR-reservien tapauksessa tuntimarkkinoiden hintoja ja pysyvyyksiä. Kyseisille markkinoille voi osallistua sekä vuosimarkkinoille että tuntimarkkinoille. Vuosimarkkinoiden hinta on kiinteä ja keskimäärin alhaisempi kuin tuntimarkkinoiden keskihinta, toisaalta pysyvyys vuosimarkkinoilla on suurempaa. Fingrid käyttää tuntimarkkinoita täydentämään reservikapasiteettia niille ajankohdille, jolloin vuosimarkkinasopimusmäärät eivät riitä. Tuntimarkkinoiden reservikapasiteettikorvaus määräytyy marginaalihinnoittelun perusteella, joka johtaa siihen, että silloin kun kapasiteettia tarvitaan vähän tai sitä on paljon tarjolla, laskee kapasiteetin hinta ja silloin kun kapasiteettia tarvitaan paljon tai sen tarjonnassa on pulaa, nousee hinta korkeaksi. Taulukkoon 12 on koottu FCR-D tuntimarkkinoilta saatavia vuositason kapasiteettikorvauksia euroissa 1 MW reservikapasiteetilla. Taulukossa ylhäällä vaakatasossa on esitetty tuntimarkkinoiden keskikorvaus muodossa €/MW ja pystyakselille vuositason pysyvyys tunneissa. Korvauksen kasvaessa väri muuttuu vihreäksi.

Taulukko 12 Reservimarkkinakorvauksen herkkyyshanalyysi

	5 €/MW	10 €/MW	15 €/MW	20 €/MW	25 €/MW	30 €/MW
3000 h/a	15000	30000	45000	60000	75000	90000
4000 h/a	20000	40000	60000	80000	100000	120000
5000 h/a	25000	50000	75000	100000	125000	150000
6000 h/a	30000	60000	90000	120000	150000	180000
7000 h/a	35000	70000	105000	140000	175000	210000
8000 h/a	40000	80000	120000	160000	200000	240000
8760 h/a	43800	87600	131400	175200	219000	262800

Keskihintaan vaikuttaa merkittävästi tarjolla olevan kapasiteetin määrä ja esimerkiksi tulevakaudella FCR reservien saatavuudesta on usein pulaa, sillä vesivoimalaitokset eivät pysty operoimaan markkinalla normaalisti. Hetkittäiset kapasiteettirajoitteet nostavat reservistä maksettavien korvausten suuruutta jopa satakertaisiksi verrattuna tilanteeseen, jossa reservintarve on pientä ja kapasiteettia paljon tarjolla. Reservistä maksettava korvaus on hyvin herkkä kapasiteetin muutoksille ja korvausten suuruus heitteleekin merkittävästi niin vuosi-, vuodenaika- ja tuntitasollakin. Reserveistä maksettavan korvauksen suuruutta on vaikea ennustaa, mutta voidaan olettaa, että korvauksen suuruuden vaihtelu tulee olemaan suurta jatkossakin. Parhaimmassa tilanteessa ovat reservitoimitajat, jotka pystyvät osallistumaan useammalle eri reservimarkkinalla tai käyttämään reservikapasiteettia myös muuhun kannattavaan liiketoimintaan silloin kuin maksettavat korvaukset ovat matalia. Nopeamman reagointiajan reservilajista on helpompi vaihtaa hitaammin reagoiviin reserveihin kuin toisinpäin.

Fingridin ennusteiden mukaan reservien tarve on kasvussa lähes jokaisessa reservilajissa. Reservien hankintamäärien kasvun on arvioitu olevan suurinta taajuuden palautusreservien ja alassäätöreservien kohdalla. Samaan aikaan sähkön tuotantorakenteessa tapahtuvan vihreän siirtymän myötä reservien teknisiä vaatimuksia joudutaan kiristämään, joka voi alentaa käytössä olevan reservikapasiteetin määrää. Yhteenveto eri reservilajien enimmäismäärien kehityksestä tulevaisuudessa on esitetty kuvassa 41. [74]



Kuva 41. Fingridin hankintaennuste reservikapasiteetin enimmäismäärästä tulevaisuudessa. [74]

7. YHTEENVETO

7.1 Työn tulokset

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksen tulokset käyttäen apuna alussa kappaleessa 1.3 määriteltyjä tutkimuskysymyksiä. Kaikki tässä luvussa esitetyt tulokset on esitelty työssä myös aikaisemmin. Tutkimuskysymykset olivat:

- Onko latausoperaattorilla mahdollisuuksia osallistua sähkön reservimarkkinoille?
- Mille reservituotteiden markkinapaikoille latausoperaattorilla riittää tekniset edellytykset osallistua?
- Onko latausoperaattorin reservimarkkinoille osallistuminen taloudellisesti järkevää liiketoimintaa?
- Kuinka reservimarkkinoille osallistuminen käytännössä tapahtuu?

Plugitin kaltaisella latausoperaattorilla on mahdollisuus osallistua sähkön reservimarkkinoille, vaikkakin osallistuminen on hyvin säänneltyä. Reservisopimuksen tekemiseksi Fingridin kanssa täytyy sekä reservitoimittajan että reservikohteen täyttää reservimarkkinoiden vaatimukset. Suurimmat haasteet latausoperaattorin näkökulmasta muodostuvat siitä, että latausoperaattori ei ole sähkön toimitusketjun osapuoli eli sähkön myyjä tai tasevastaava ja säädettävä reservikapasiteetti on usein hyvin hajallaan. Jotta reservimarkkinoiden minimi tarjouskoot ylittyvät, vaaditaan itsenäistä aggregointia eli reserviresurssien yhdistämistä suuremmaksi kokonaisuudeksi. Itsenäisellä aggregaattorilla tarkoitetaan toimijaa, joka ei ole kohteen sähkön myyjä tai tasevastaava. Itsenäinen aggregointi on sallittua FFR, FCR ja rajoitetusti aFRR reserveissa, mutta ei laisinkaan mFRR reservissä.

Reservitarjoukset on tehtävä saman tasevastaavan taseesta kaikissa muissa reservilajeissa paitsi FFR ja FCR-D reserveissa. Lisäksi reservikohteen tasevastaava on informoitava reservikäytöstä ja reserviresurssin tasevastaavan vaihtuessa Fingridille täytyy ilmoittaa muutoksesta kirjallisesti vähintään 14 vuorokautta ennen muutosta. Tämän seurauksena kuluttajatasolle viety aggregointi on käytännössä mahdotonta, sillä silloin tasevastaavien lukumäärä kasvaisi hallitsemattoman suureksi. Parhaimmat mahdollisuudet latausoperaattorilla on osallistua reservimarkkinoille DC-latausta hyödyntävillä suuriin lataustehoihin yltävillä latausvarikoilla tai asentamalla suuria energiavarastoja latausasemien yhteyteen.

Latausoperaattorin tehon säädön nopeus on muutamien sekuntien luokkaa, jolloin osallistuminen on mahdollista FCR-D, FCR-N ja aFRR reserveihin. FCR-N reservissä säädön on oltava symmetristä alas- ja ylöspäin, minkä takia latausoperaattori ei pysty siihen osallistumaan ilman latauskapasiteetin merkittävää rajoittamista. Käytännössä soveltuvat reservilajit rajoittuvat latausoperaattorin näkökulmasta FCR-D ja aFRR ylösäättöreserveihin. Näistä kahdesta FCR-D soveltuu latausoperaattorille huomattavasti paremmin, sillä reservin aktivoituminen kestää keskimäärin vain kymmeniä sekunteja ja tarvittava säätömäärä on usein alle 50 % kapasiteetista. aFRR reservi aktivoituu aina täysimääräisesti ja aktivoinnin kesto on usein pitkä. aFRR reservin itsenäiseen aggregointiin on tulossa rajoitteita ensivuoden aikana.

FCR-D reservi vaati aina paikallisen taajuuteen perustuvan ohjausjärjestelmän rakentamisen ja koska taajuusmittauksen tarkkuusvaatimukset ovat korkeat (± 10 mHz) ei esimerkiksi Hube Pro DC:n nykyinen taajuusmittari yllä riittävään tarkkuuteen. [82] aFRR reservissä ohjaus perustuu Fingridiltä tulevaan ohjaussignaaliin ja ohjausjärjestelmän rakentaminen on yksinkertaisempaa.

Fingridille tulee lähettää reaaliaikaisesti tietoa reservikohteen tilasta FCR-D reservissä 60 s päivityssyklillä ja aFRR reservissä 10 s päivityssyklillä. FCR-D reservissä reaaliaikainen tiedonsiirto voidaan toteuttaa web-pohjaisesti, mutta aFRR reservissä tiedonsiirto pitää tehdä analogisesti FEN- tai KoVa-FEN verkkoa pitkin. Käytännössä tämä tarkoittaa erillisen palveluntarjoajan hankkimista, jolta löytyy ennestään vaadittava yhteys kommunikoinnin hoitamiseen. Palveluntarjoajalle reaaliaikatiedot voidaan lähettää web-pohjaisesti.

Reservimarkkinoille osallistuminen kannattavuutta on vaikea arvioida voimakkaasti heiluvien reservikorvausten takia, mutta lähtökohtaisesti pelkästään reservimarkkinoiden tuottojen varaan ei voi rakentaa kannattavaa liiketoimintaa. Jos reservikohteella on jokin muu pääasiallinen käyttötarkoitus kuten latausoperaattorin näkökulmasta sähköajoneuvojen lataaminen, voi reservimarkkinoista saada erittäin hyvän lisätulon vaadittavaan lisäinvestointiin nähden. Euromääräisesti 1 MW reservikapasiteetilla esimerkiksi FCR-D markkinassa on mahdollista saada 80–200 k€ bruttotuloa.

Reservimarkkinoille osallistuminen vaatii Fingridin reservikohtaisten säätökokeiden suorittamista. Säätökokeilla varmistetaan reservikohteen teknisten vaatimusten täyttyminen ja oikeanlainen käyttäytyminen. Kun säätökokeet on suoritettu ja Fingrid hyväksynyt säätökoepöytäkirjan, toimittaa Fingrid siirtotunnuksen reaaliaikatiedonsiirtoa varten ja reservisopimus voidaan tehdä. Prosessin kesto kokonaisuudessaan voi olla useita kuukausia,

vaikka reservikohde olisikin täysin reservimarkkinoille sopiva. Lisää säätökokeista kappaleessa 4.3.1 ja reservimarkkinoille osallistumisesta kappaleessa 3.9.

Plugitilla on kaikki edellytykset osallistua kannattavasti sähkön reservimarkkinoille ensisijaisesti FCR-D markkinalle ja toissijaisesti aFRR markkinalle. Suurin investointi reservimarkkinoille osallistumiseksi muodostuu vaadittavista työtunneista, jotta järjestelmä saadaan vastaamaan reservimarkkinoiden tarpeita. Materiaali-investoinnit jäävät hyvin pieniksi, sillä Plugitin DC-latausjärjestelmät ovat hyvin älykkäitä ja säädettäviä jo valmiiksi. Kun reservimarkkinoille on päästy mukaan, vaatii siellä toimiminen enää suhteellisen vähän aktiivista työskentelyä. Reservimarkkinoilla toimiminen siis skaalautuu merkittävästi, kunhan järjestelmä vain on ensin rakennettu reservimarkkinoille sopivaksi.

Työn tuloksien perusteella Plugitin kannattaa jatkaa toimenpiteitä reservimarkkinoille osallistumiseksi varsinkin akustoilla varustetun raskaan liikenteen latausverkoston avulla. Akustolla varustetun latausaseman avulla voidaan rauhassa testata järjestelmän toimintaa ja soveltuvuutta reservimarkkinoille, ennen virallisia säätökokeita. Kun järjestelmä ja Plugitin osaaminen reservimarkkinoista on riittävällä tasolla, voidaan reservimarkkinoille osallistumista laajentaa ja tarjota palvelua myös asiakkaiden suurille latausvarikoille.

7.2 Pohdinta

Työssä saavutettiin alussa määritellyt tavoitteet ja kaikkiin tutkimuskysymyksiin pystyttiin vastaamaan. Reservimarkkinoille osallistumista käytännön tasolla ei pystytty saattamaan loppuun sillä reservimarkkinoille osallistuminen on iso ja raskas prosessi, mutta askelmerkit sen suuntaan on selvillä. Tämän seurauksena työstä muodostui hyvin teoriapainoinen, sillä mitään käytännön testejä esimerkiksi akustolla varustetulla latausasemalle ei päästy suorittamaan laitteiston keskeneräisyyden takia. Tämän diplomityön tutkimuksen perusteella Plugitilla on mahdollisuudet jatkaa työtä reservimarkkinoille osallistumiseksi. Työn aikana kirjoittajalle muodostui laaja osaaminen reservimarkkinoista ja hyvä ymmärrys sähköisistä ajoneuvoista, sekä niiden latausjärjestelmistä. Diplomityön suorittaminen antoi myös hyvän läpileikkauksen Plugitin liiketoimintoihin ja toimi hyvänä tapana päästä sisään alalle. Diplomityöprosessin helpottamiseksi työn tavoitteet olisi voinut määritellä alussa hiukan selkeämmin, jolloin sekä työn tilaajalla että tekijällä olisi ollut kirkas visio työn kokonaisuudesta.

Reservimarkkinoiden ehdot muuttuvat ja tarkentuvat jatkuvasti, sillä sähkön tuotanto on suuressa muutoksessa vihreän siirtymän myötä, jonka takia reservienkin vaatimukset

kasvavat. Reservimarkkinoiden vaatimukset muuttuivat diplomityön kirjoitusprosessin aikana ainakin kahteen kertaan. Ensimmäisen kerran varttitaseeseen siirtymisen yhteydessä 22.5.2023 ja toisen kerran 1.9.2023 jolloin uudet tekniset vaatimukset FCR reserville otettiin käyttöön. Kesäkuussa 2024 on tarkoitus päivittää aFRR, FFR ja uudestaan FCR reservien ehtoja. Jatkuvasti muuttuvien ehtojen takia työssä kerrottu tilanne kuvastaa kesän 2023 tilannetta. Plugitin näkökulmasta 1.9.2023 astuneet muutokset eivät estä FCR-D reserviin osallistumista, sillä kulutuskohteilla ja akkuvarastoilla ei tule lähtökohteisesti esteitä täyttää uusiakaan teknisiä vaatimuksia. Suurimmat erot vanhoihin tekniisiin vaatimuksiin löytyy uudesta aktivoitumisnopeudesta ja uusista stabiiliuden vaatimuksista. Aikaisemmin FCR-D kapasiteetista 50 % tuli olla aktivoituneena 5 sekunnissa, kun uusissa vaatimuksissa 86 % tulee olla aktivoituneena 7,5 sekunnissa. Uudet reagointivaatimukset vaikuttavat eniten suuriin vesivoimalaitoksiin fyysisten säätörajoitteiden takia. Fingrid julkaisee lähiaikoina tarkennuksia esimerkiksi säätökokeiden suorittamiseen uusien teknisten vaatimusten mukaisesti. [83] Uudet tekniset vaatimukset on esitetty työn viimeisenä lähteenä [84].

LÄHTEET

- [1] Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050, Työ- ja elinkeinoministeriön raportti, 22.2.2019, Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf?t=155446767000>
- [2] L. Ihamäki, Energiamurros näkyy kasvavina reservien tarpeina ja reservien hankintakustannuksina, FINGRID-verkkolehti, 08.07.2022, Viitattu 27.3.2023, Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/energiamurros-nakyy-kasvavina-reservien-tarpeina-ja-reservien-hankintakustannuksina/>
- [3] V. Tikka, J. Kalenius, O. Räisänen & J. Lassila, Loppuraportti: Sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitusteho erilaisissa toimintaympäristöissä, LUT School of Energy Systems, Tutkimusraportti 131, Lappeenranta, 2021, s. 59, Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163366/Loppuraportti.pdf?sequence=1>
- [4] Fingrid, Reservitoimittajat ja heidän toimittamansa reservituotteet, Verkkolähde, 20.2.2023, Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahko-markkinat/reservit/Reserve_suppliers.pdf
- [5] Virta, Eaton ja Virta mahdollistavat energian varastointijärjestelmien osallistumisen markkinoille, Verkkolähde, 4.2.2021, Saatavissa: <https://www.virta.global/fi/uutiset/iso-edistysaskel-energiajoustomarkkinoilla-eaton-ja-virta-mahdollistavat-energian-varastointijarjestelmien-osallistumisen-markkinoille>
- [6] P. Leinonen, Mitä on inertia? FINGRID-verkkolehti, 11.9.2018, Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- [7] Plugit, Tietoa meistä, N.d, Saatavissa: <https://plugit.fi/yritys/>
- [8] Plugit Cloud, Yhtiön sisäinen raportointi, Luottamuksellinen
- [9] A. Visa, Tuotekehitys, Tampereen yliopiston kurssimateriaali
- [10] K. Lukka, Konstruktiivinen tutkimusote, Metodix, Verkkootikkeli, 2001, Viitattu 28.3.2023, Saatavissa: <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>
- [11] Arjen älykäs sähköautoilu, Motiva, N.d, Saatavissa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/sahkoautoillen-ajon-alykas-sahkoautoilu>
- [12] Traficom, Tilastotietokanta, Liikennekäytössä olevat ajoneuvot käyttövoimittain, Viitattu 9.3.2023, Saatavissa: https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi_Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/030_kanta_tau_103.px/

- [13] Kysymyksiä ja vastauksia keskipitkän ilmastopolitiikan suunnitelmasta, Ympäristöministeriö, N.d, Viitattu 9.3.2023, Saatavissa: <https://ym.fi/keskipitkan-aikavaliin-ilmastopolitiikan-suunnitelma/kysymyksiä-ja-vastauksia>
- [14] Fossiilittoman liikenteen tiekartta, Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä, Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:15, Helsinki, 2021, s 54, Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163258/LVM_2021_15.pdf
- [15] European Climate Law, Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999, Viitattu 9.3.2023, Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/req/2021/1119/oj>
- [16] Finlex, Ilmastolaki, 423/2022, 2022, 2 §, Viitattu 9.3.2023, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220423#Pidm45053757885184>
- [17] Euroopan Parlamentti, Vaihtoehtoisia polttoaineita autoille: niiden käytön lisääminen, Verkkouutinen, 16.11.2022, Viitattu 13.3.2023, Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20221013STO43019/vaihtoehtoisia-polttoaineita-autoille-niiden-kayton-lisaaminen>
- [18] Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure, OJ L 307, 28.10.2014, p. 20, Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=EN>
- [19] Traficom, Tilastotietokanta, Ensirekisteröityjen ajoneuvojen käyttövoimatilastot, Viitattu 9.3.2023, Saatavissa: <https://tieto.trafficom.fi/fi/tilastot/ensirekisteroityjen-ajoneuvojen-kayttovoimatilastot>
- [20] Finlex, Laki liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelusta, 478/2017, 2017, Viitattu 5.5.2023, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170478>
- [21] European Parliament, Fit for 55: zero CO2 emissions for new cars and vans in 2035, Lehdistötiedote, 14.02.2023, Verkkajulkaisu, Viitattu 13.03.2023, Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230210IPR74715/fit-for-55-zero-co2-emissions-for-new-cars-and-vans-in-2035>
- [22] ST-Käsikirja 41, Sähköajoneuvot ja latausjärjestelmät, Sähkötieto ry, 6., uudistettu painos, Espoo, 2022, s. 149
- [23] Autoalan Tiedotuskeskus, Ensirekisteröityjen henkilöautojen käyttövoimatilastot, 2.1.2023, Viitattu 14.3.2023, Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain/henkiloautojen_kayttovoimatilastot
- [24] L. McDonald, evstatistics, Average Range and Battery Size of PHEVs Currently Available in the US, 22.10.2021, Verkkoinfo, Viitattu 16.3.2023, Saatavissa: <https://evstatistics.com/2021/09/average-range-and-battery-size-of-phevs-currently-available-in-the-us/>

- [25] D.D. Tran, M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, R. Barrero, J. Van Mierlo, O. Hagazy, Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 119, Article 109596, March 2020, Viitattu 16.3.2023, Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032119308044?via%3Dihub>
- [26] J. Kelly, Leasing.com, Updated: The best plug-in hybrids ranked by electric range 2022, 2.12.2022, Verkkolehti, Saatavissa: <https://leasing.com/top-picks/best-hybrids-for-electric-range-plug-in/>
- [27] J. Crawford, Early cars: gas, electric & steam, 2018, Viitattu 14.3.2023, Saatavissa: <https://rootsofprogress.org/early-cars-gas-electric-and-steam>
- [28] A. Lajunen, Evaluation of energy consumption and carbon dioxide emissions for electric vehicles in Nordic climate conditions, Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 10-12 April 2018, p. 7, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362390/authors#authors>
- [29] S. Kremzow-Tennie, M. Hellwig, F. Pautzke, A study on the influencing factors regarding energy consumption of electric vehicles, 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Cracow, Poland, 9-11 December 2020, p. 6, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9313934/references#references>
- [30] M. Ghalkhani, S. Habibi, Review of the Li-Ion Battery, Thermal Management, and AI-Based Battery Management System for EV Application, *Energies* 2023, Vol 16(1), 185, 24.12.2022, p. 16, Verkkoartikkeli, Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/185>
- [31] V. Vaideeswaran, M. Ragul, V. Keerthana, C. Sindhu Priyadharshini, M. Prathiksha, Review on Selection of Battery Packs for Pure Electric Vehicles and Technical Comparison of Battery Packs, 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Kuala Lumpur, Malaysia, 27-29 November 2021, Saatavissa: [10.1109/i-PACT52855.2021.9696733](https://doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696733)
- [32] A. Rachid, H. El Fadil, K. Gaouzi, K. Rachid, A. Lassioui, Z. El Idrissi, M. Koundi, Electric Vehicle Charging Systems: Comprehensive Review, *Energies* 2023, Vol. 16(1), 255, 26.12.2022, p. 38, Verkkoartikkeli, Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/255>
- [33] R. Bisschop, O. Willstrand, F. Amon, M. Rosengren, Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles, RISE Report 2019:50, Toukokuu 2019, p. 107, Saatavissa: [10.13140/RG.2.2.18738.15049](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049)
- [34] ABB, Älykkäämpää liikennettä, raskaiden hyötyajoneuvojen lataaminen, Verkko-lähde, Viitattu 21.3.2023, Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/63f39289358547bf9a00ec2dd08ce9b1/Raskaiden%20hyotyajoneuvojen%20lataaminen.pdf>
- [35] Plugit, Case_ HSL ja Espoon Leppavaaran mittava sähköbussien latauskokonaisuus, N.d., Viitattu 21.3.2023, Saatavissa: <https://plugit.fi/wp-content/uploads/2021/11/sahkobussit-julkinen-liikenne.jpg>

- [36] C. Colombo, S. Miraftebzadeh, A. Saldarini, M. Longo, M. Brenna, W. Yaici, Literature Review on Wireless Charging Technologies: Future Trend for Electric Vehicle? 2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART), Cassino, Italy, 23-25 November 2022, Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/9990331/authors#authors>
- [37] S. Inamdar, J. Fernandes, Review of Wireless Charging Technology For Electric Vehicle, 2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON), New Delhi, India, 25-27 November 2022, Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/10045150/authors#authors>
- [38] SESKO, Sähköautojen lataussuositus 2021, 17.2.2021, 5. painos. p. 8, Viitattu 21.3.2023, Saatavissa: https://sesko.fi/wp-content/uploads/2021/11/SESKO_lataussuositus_2021-02-17.pdf
- [39] Nordig Plug, TOGO SUPER - KANNETTAVA SÄHKÖAUTON LATAUSLAITE VOIMAVIRTAAN, Verkkolähde, N.d., Viitattu 23.3.2023, Saatavissa: <https://nordicplug.fi/collections/kannettavat-sahkoauton-latauslaitteet/products/togo-super-sahkoauton-latauslaite-voimavirtaan-22kw>
- [40] Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets. Conductive charging of electric vehicles. Part 2: Dimensional compatibility requirements for AC pin and contact-tube accessories, Suomen Standardoimisliitto, SFS-EN IEC 62196-3:2022, Helsinki, 2022, p. 70, Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/1171740.html.stx>
- [41] Plugit, Latauspistoketyypit sähköautoille, N.d., Viitattu 22.3.2023, Saatavissa: <https://plugit.fi/artikkelit/latauspistoketyypit-sahkoautoille/>
- [42] Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets. Conductive charging of electric vehicles. Part 3: Dimensional compatibility requirements for DC and AC/DC pin and contact-tube vehicle couplers, Suomen Standardoimisliitto, SFS-EN IEC 62196-3:2022, Helsinki, 2022, p. 70, Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/1170390.html.stx>
- [43] Enelxway, The different EV charging connector types, 20.4.2019, Verkkolähde, Saatavissa: <https://www.enelxway.com/us/en/resources/blog/ev-charging-connector-types>
- [44] E. Hongisto, V2X (VEHICLE-TO-EVERYTHING) - YHTEYDET WLAN-, LTE- JA 5GVERKOISSA, Tampereen yliopisto, Kandidaatintyö, Lokakuu 2020, s. 20. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202010277538>
- [45] V. Linja-aho, SÄHKÖAUTON KAKSISUUNTAINEN LATAUS, Secto Automotive, 26.1.2023, Verkoartikkeli, Saatavissa: <https://secto.fi/ajankohtaista/sahkoautot/sahkoauton-kaksisuuntainen-lataus/>
- [46] J. Svarc, Bidirectional Chargers Explained – V2G Vs V2H Vs V2L, 9.1.2023, Clean Energy Reviews, Verkoartikkeli, Saatavissa: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-charging-v2g-v2h-v2l>
- [47] M. Galkin-Aalto, Suomen ensimmäinen kaksisuuntainen latauspiste Helsinkiin, Helenin verkkouutinen, 13.9.2017, Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2017/v2g>

- [48] T. Simolin, Electric Vehicle Charging Load Management, Algorithm and Modelling Perspectives, Tampere University Dissertations 642, Joensuu 2022, p. 62, Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2505-3>
- [49] Electric vehicle conductive charging system. Part 1: General requirements, Suomen Standardoimisliitto, SFS-EN IEC 61851-1:2019, Helsinki, 2019, p. 139, Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/789446.html.stx>
- [50] Vector, Communication Protocols, Verkkolähde, Viitattu 8.5.2023, Saatavissa: <https://www.vector.com/se/en/know-how/smart-charging/communication-protocols/#>
- [51] Road vehicles. Vehicle to grid communication interface. Part 1: General information and use-case definition, SFS-EN ISO 15118-1:2019, Helsinki, 2019, p. 133, Saatavissa rajoitetusti: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN-ISO/ID2/1/766199.html.stx>
- [52] T. Simolin, Sähköajoneuvojen latausjärjestelmän ja -keskuksen kehittäminen, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201805141682>
- [53] J. Partanen, S. Annala, J. Lassila, S. Honkapuro, Sähkömarkkinta – opetusmoniste, LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO, Lappeenranta, 2020, s. 84
- [54] Energiavuosi 2022 Sähkö, Energiateollisuus ry, 12.1.2023, Saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf
- [55] Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä, N.d., Verkkolähde, Viitattu 13.4.2023, s. 79, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- [56] Fingrid, Johdanto sähkömarkkinoihin, N.d., Viitattu 19.4.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>
- [57] Fingrid, Pohjoismainen tasehallinta, N.d., Viitattu 26.4.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/>
- [58] M. Laasonen, Sähköjärjestelmän matalan inertian hallinta, Fingrid, Käyttötoimikunta 12.6.2018, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/180612-sahkojarjestelman-matalan-inertian-hallinta.pdf>
- [59] Fingrid, Varttitaseen käyttöönotto 22.5.2023, Verkkolähde, 22.3.2023, Viitattu 26.4.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/varttitase/varttitaseen-kaytoonotto-suomessa-22.5.2023-paivitetty-22.3.2023.pdf>
- [60] ELFI, Sähkön hinta, Verkkouutinen, N.d., Viitattu 15.8.2023, Saatavissa: <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkon-hinta/>
- [61] Fingrid, Sähköjärjestelmän tila, N.d. Viitattu 14.4.2023. Päiväkohtainen data saatavissa: <https://www.fingrid.fi/-/custom/sahkojarjestelman-tila-169/>

- [62] NORDPOOL, Aggerated order price curves, päiväkohtainen verkkoaineisto, Viitattu 13.4.2023, Saatavissa: https://aggregated-market-data-latest.nordpoolgroup.com/AggregatedOrder_PriceCurves_FI.pdf
- [63] Fingrid, Reservimarkkinat, N.d., Viitattu 25.4.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>
- [64] Fingrid, Reservituotteet ja reservien markkinapaikat, Julkinen esitysmateriaali, 27.2.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- [65] Fingrid, Fingridin reservikaupankäynti ja tiedonvaihto -ohje, Verkkolähde, 4.7.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fingridin-reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto-ohje-20230704.pdf>
- [66] Fingrid, Kuinka osallistua reservimarkkinoille, Verkkolähde, Viitattu 28.4.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>
- [67] Fingrid, Reservimarkkinainformaatio, Verkkolähde, N.d., Viitattu 28.7.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/>
- [68] Fingrid, Tasepalvelut, Verkkolähde, Viitattu 22.5.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/>
- [69] Sähkökäytön kysyntäjousto, Suomen Sähkökäyttäjät ry (ELFI), Verkkolähde, Viitattu 29.5.2023, Saatavissa: <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto/>
- [70] Fingrid, Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle, Verkkolähde, 22.5.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-nopean-taajuusreservin-ffr-toimittajalle.pdf>
- [71] Fingrid, Frequency quality analysis 2021, Verkkolähde, 18.8.2022, Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/frequency_quality_analysis_2021_public.pdf
- [72] Fingrid, Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin (FCR) toimittajalle, Verkkolähde, 22.5.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-taajuuden-vakautusreservin-fcr-toimittajalle.pdf>
- [73] Fingrid, Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi, Voimassa 22.5.2023 alkaen, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/taajuuden-vakautusreservien-fcr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisprosessi.pdf>
- [74] Fingrid, Reservimarkkinapäivän materiaali, 8.6.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/reservimarkkinapaiva-8.6.2023-esitykset-final.pdf>

- [75] Fingrid, Ehdot ja edellytykset automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) toimittajalle, Verkkolähde, 22.5.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ehdot-ja-edellytykset-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-toimittajalle-suunniteltu-voimaantulo-toukokuu-2023.pdf>
- [76] Fingrid, Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi, Verkkolähde, Viitattu 14.6.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/uusi-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisproessi.pdf>
- [77] Fingrid, Säätosähkömarkkinoiden aggregointipilotti, Verkkolähde, Viitattu 15.5.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pilottihankkeita/saatosahkomarkkinoiden-aggregointipilotti/>
- [78] T. Pahkala, H. Uimonen, V. Väre, Työ- ja elinkeinoministeriö, Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä; Älyverkkotyöryhmän loppuraportti, 24.10.2018, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-346-7>
- [79] Fingrid, Keskustelutilaisuus tuulivoiman osallistumisesta reservimarkkinoille, Verkkolähde, 8.12.2022, Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/tuulivoimakeskustelutilaisuuden_materiaali_08122022.pdf
- [80] Plugit, Yhtiön sisäiset tietokannat Power BI-järjestelmässä, Ei vapaasti saatavissa.
- [81] P. Punkari, YLE, Suomen ensimmäinen ammattiliikenteen julkinen latausasema rakennetaan Tampereelle, 17.4.2023, Verkkolähde, Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20027380>
- [82] ABB, SACE Tmax XT, Low voltage molded case circuit-breakers catalog, Verkkolähde, Viitattu 14.8.2023, Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC210100D0206&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [83] P. Ruokolainen, Fingrid, Teams-keskustelu liittyen FCR reservien uusiin tekniisiin vaatimuksiin, 31.8.2023
- [84] Fingrid, Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi, voimassa 1.9.2023 alkaen, Verkkolähde, Viitattu 5.9.2023, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-2-taajuuden-vakautusreservien-fcr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisproessi.pdf>

LIITE A: RESERVILAJIEN REAALIAIKASIGNAALIT

		Päivitetty 29.5.2023									
Reservilaji	Tyyppi	Lähetäjä	Vastaanottaja	Päivitysyksykki	Signaali	Salittu teknikka	Yksikkö	Selite			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	10 s	aFRR kapasiteetti ylös	Elcom / ICCP	MW	Reservin ylläpitoon myyty kapasiteetti, jos kapasiteettia ei rajoita maksimitheho. Huomaa, jos tilausta aFRR reservin ylläpidosta johtuen vapaa kapasiteetti on pienempi kuin myyty aFRR kapasiteetti, ei tämä pienemmä aFRR kapasiteettia.			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	10 s	aFRR kapasiteetti alas	Elcom / ICCP	MW	Reservin ylläpitoon myyty kapasiteetti, jos kapasiteettia ei rajoita minimiteho. Huomaa, jos tilausta aFRR reservin ylläpidosta johtuen vapaa kapasiteetti on pienempi kuin myyty aFRR kapasiteetti, ei tämä pienemmä aFRR kapasiteettia.			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	10 s	aFRR aktivoituneen reservin määrä	Elcom / ICCP	MW	Toteutunut aFRR reservin aktivoitumisteho. Pitää sisällään peikan aFRR tehon, ei reservikohteen muuta päätötehon tuotantoa.			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	10s	aFRR hetkellinen päätöteho	Elcom / ICCP	MW	Reservikohteen päätötehomittaus tai muu reaaliaikainen tieto			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	10 s	Aktivoitsignaalin takaisinlähetys	Elcom / ICCP	MW	Fingridin lähettämän aktivoitsignaalin takaisinlähetys.			
aFRR	Analogia	Fingrid	Reservitoimittaja	10 s	aFRR aktivoitsignaali	Elcom / ICCP	MW				
aFRR	Analogia	Fingrid	Reservitoimittaja	4s	aFRR watchdog-signaali	Elcom / ICCP	-	Watchdog-signaali tietoliikenneyhdyden ja vastaanotettavan järjestelmän toiminnan valvontaan.			
aFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	4s	aFRR watchdog-signaalin takaisinlähetys	Elcom / ICCP	-	Watchdog-signaalin takaisinlähetys.			
mFRR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	mFRR reservin aktivointi	Elcom / ICCP / web	MW	Reservikohteen päätötehomittaus tai muu reaaliaikainen tieto, jolla aktivointi voidaan todentaa.			
FCR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	FCR-N ylläpidettävä reservimäärä	Elcom / ICCP / web	MW	Ylläpidettävä Taaajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) määrä. Ylläpidettävä reservimäärä on todellinen käytettävissä oleva reservimäärä. Reservin aktivoitumisen ei tule pienentää ylläpidettyä määrää.			
FCR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	FCR-D ylläpidettävä reservimäärä ylös	Elcom / ICCP / web	MW	Ylläpidettävä Taaajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) määrä ylös. Ylläpidettävä reservimäärä on todellinen käytettävissä oleva reservimäärä. Reservin aktivoitumisen ei tule pienentää ylläpidettyä määrää.			
FCR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	FCR-D ylläpidettävä reservimäärä alas	Elcom / ICCP / web	MW	Ylläpidettävä Taaajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) määrä alas. Ylläpidettävä reservimäärä on todellinen käytettävissä oleva reservimäärä. Reservin aktivoitumisen ei tule pienentää ylläpidettyä määrää.			
FCR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	Jäijellä oleva FCR-N aktivoitukyky	Elcom / ICCP / web	minutes	Rajallisen aktivoitukyvyn reservikohteista (Limited Energy Reservoir, LER), eli kunke pitkään reservikohte pysyvä aktivoimaan reservikapasiteetin täysimääräisesti ja yhtäjaksoisesti sillä hetkellä käytettävissä olevalla energiamäärällä. FCR-N:lle raportoidaan aktivoitukyky ylös- tai alasääntöön sen mukaan, kumpaan suuntaan luku on pienempi raportointihetkellä. Raportointi minuuteissa.			
FCR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	Jäijellä oleva FCR-D aktivoitukyky	Elcom / ICCP / web	minutes	Rajallisen aktivoitukyvyn reservikohteista (Limited Energy Reservoir, LER), eli kunke pitkään reservikohte pysyvä aktivoimaan reservikapasiteetin täysimääräisesti ja yhtäjaksoisesti sillä hetkellä käytettävissä olevalla energiamäärällä. Raportointi minuuteissa.			
FCR	Status	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	Normaalitilan varustason hallinnan (NEM) status	Elcom / ICCP / web	on = 1 / off = 0	Rajallisen aktivoitukyvyn reservikohteista (Limited Energy Reservoir, LER)			
FCR	Status	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	Hälytystilän varustason hallinnan (AEM) status	Elcom / ICCP / web	on = 1 / off = 0	Rajallisen aktivoitukyvyn reservikohteista (Limited Energy Reservoir, LER)			
FFR	Analogia	Reservitoimittaja	Fingrid	60 s	FFR ylläpidettävä reservimäärä	Elcom / ICCP / web	MW	Ylläpidettävä Nopean taajuusreservin määrä. Tulee kuvata sen hetkistä todellista ylläpidettyä Nopean taajuusreservin määrää. Reservin aktivoitumisen ei tule pienentää ylläpidettyä määrää.			

