



LISÄÄNTYVÄN TUULIVOIMAN VAIKUTUKSET SUOMEN SÄÄTÖSÄHKÖMARKKINOIHIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

01.12.2022

Taneli Koskela

Tarkastajat: Dosentti, TkT Aki Grönman LUT

Dosentti TkT Ahti Jaatinen-Värri LUT

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Taneli Koskela

Lisääntyvän tuulivoiman vaikutukset Suomen säätösähkö markkinoihin

Energiatekniikka

Diplomityö

2022

75 sivua, 30 kuvaa, 5 taulukkoa

Tarkastajat: Dosentti Aki Grönman ja Dosentti Ahti Jaatinen-Värri

Avainsanat: Tuulivoima, Sähkömarkkinat, Sääntökauppa, Sähkön hinta, Reservimarkkinat, Tuulisähkön tuotanto, Tuulisähkön teho (MW), Pohjoismaiset sähkömarkkinat

Tuulivoiman lisääntymisen vuoksi, on suomen säätösähkömarkkinoiden muuttuminen ja kehittyminen tärkeässä asemassa, jotta voidaan vastata muuttuvaan tuotantorakenteeseen, sekä sen mukanaan tuomiin haasteisiin. Sääntökaupalla tulee myös tulevaisuudessa olemaan tärkeä rooli kantaverkon hallinnassa.

Tuulivoiman määrä suomen alueella on tarkastelujaksolla vuodesta 2017 vuoteen 2021 puolitoista kertaistunut, joka on merkittävä kasvun määrä lyhyessä ajassa. Suomen tuulivoiman määrä on lisääntynyt vuodesta 2013, jonka jälkeen tuulivoiman vuosituotanto (GW) on kymmenkertaistunut.

Sähkön kantaverkolla on tärkeää ottaa huomioon inertian muutokset ja lähinnä sen väheneminen, jotta sähköverkon sääntövoima voi paremmin vastata taajuuden muutoksiin ja tämä auttaa siihen, että suurien verkonhäiriöiden mahdollisuus pienenee.

Tutkimustulokset osoittavat, että tuulivoiman lisääntyminen ei vielä ole vaikuttanut sääntökauppojen määrään vielä sääntömarkkinoilla ja sääntövoiman tuntikohtaiset määrät ovat jopa vähentyneet. Sääntökaupan sääntöteho on vastaavasti kasvanut tarkastelujaksolla 2017–2021. Myös sääntöhinnan ero aluehintaan on kasvanut. Sama suunta on huomattavissa myös ylös sekä alas säädössä tarkastelujakson aikana.

Sääntösähkön korkeisiin yksittäisiin tuntihintoihin ei myöskään ole selkeää syy-seuraussuhdetta, sillä esimerkeissä on tunteja, jolloin aluehinta on ollut matala mutta yksittäiset sääntöhinnat ja volyymit ovat nousseet ennätyskorkeiksi.

Tutkimuksessa todetaan myös, että vuonna 2020 sääntösähkön volyyymi ylös säädössä on kaikista korkein tarkastelujaksolla, vaikka kyseisenä aikana sähkön aluehinta on ollut kaikista matalin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Taneli Koskela

The effects of increasing wind power on the Finnish regulated electricity market

Energy technology

Master's thesis.

2022

75 pages, 30 figures, 5 tables

Examiners: Docent Aki Grönman, Docent Ahti Jaatinen-Värri

Keywords: Wind power, Electricity market, Regulation trade, Electricity price, Reserve market, Wind electricity production, Wind electricity power (MW)

Due to the increasing wind power, the change and development of the Finnish regulated electricity market is in an important position in order to respond to the changing production structure and the challenges what it brings. The regulation trade will also play an important role in the management of the main grid in the future.

The amount of wind power in Finland has increased by one and a half times during the review period from 2017 to 2021, which is a significant amount of growth in a short time. The growth of Finnish wind power started in 2013, after which the annual production (GW) of wind power has increased tenfold.

Electricity network is important to consider the changes in inertia and mainly its reduction, so that the control power of the electricity network can better respond to changes in frequency, and this helps to reduce the possibility of major network disturbances.

The research results show that the increase in wind power has not yet affected the number of regulation trades in the regulation market, and the hourly amounts of regulation power have even decreased. But the volume of power trade has correspondingly increased in the review period 2017–2021. The difference between the adjustment price and the regional price has also increased, and the upward adjustment price, when the adjustment trade takes place, has also increased. The same has also happened in the implemented downward adjustment prices.

There is also no clear cause-and-effect relationship for the high individual hourly prices of regulated electricity, as the examples include hours when the regional price has been low, but the individual regulated prices and volumes have risen to record highs.

The study also states that in 2020, the volume of regulated electricity in the upward adjustment is the highest of all in the review period, even though the regional price of electricity has been the lowest during that period.

KIITOKSET

Haluan antaa kiitokseni yliopistolta Aki Grönmanille ja Ahti Jaatinen-Värrille, jotka jaksoivat kannustaa ja uskoa siihen, että saan diplomityöni valmiiksi, vaikka sen tekemiseen menikin luvattoman kauan. Lisäksi kiitokset kotiin, että jaksoit luoda uskoa, että kyllä se työ siitä valmistuu, vaikka välillä onkin ollut haasteita.

Tämän diplomityön myötä sain kahden ja puolen vuoden taipaleeni Lappeenrannan yliopistolla valmiiksi ja iso kiitos siitä kuuluu ENTEDI-ohjelmalle, joka on antanut mahdollisuudet siihen, että voin yhteensovittaa sekä työelämän, että koulun tuomat haasteet ja mahdollisuudet. Lisäksi iso kiitos kaikille heille koululta, joiden kanssa olen tehnyt ryhmätyöt ja voinut kysyä apua, jos jokin asia on aiheuttanut suuria haasteita.

Symboli- ja lyhenneluettelo

Symbolit

DA	Day-ahead
GW	Gigawatti
ID	Intraday
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti
m/s	Metriä sekunnissa

Lyhenteet

aFFR

Automaattinen taajuuden hallinta reservi tuote

Alas säätö

Tuotannon vähennys tai kulutuksen lisäys

Alas säätötarjous

Säätösähkömarkkinoille annettava tarjous tuotannon pienentämisestä tai kulutuksen lisäämisestä.

Tarjouksen aktivoituessa säädön toteuttaja ostaa säätösähköä Fingridiltä.

ASC

Säätöpalvelun hinta (Espanja)

Elbas

Elbas on markkinapaikka Elspotin jälkeisille fyysisille sähkökaupoille (intraday).

Elspot

on markkinapaikka seuraavan vuorokauden fyysisille sähkökaupoille (day-ahead).

FCR

Yleinen nimitys taajuuden vakautusreserveistä

FCR-N

Automaattisesti ohjattu käyttö reservituote

FCR-D

Automaattisesti ohjattu häiriöreservi tuote

FFR

Nopea taajuusreservi

Hintariski

Riski, joka aiheutuu sähkön hinnan muodostuksesta

HVDC-yhteys

Korkeajännitteinen tasavirta linja

Inertia

Tarkoittaa sähköjärjestelmän pyörivien massojen varastoitunutta liike-energiaa, sen kykyä vastustaa sähköjärjestelmän muutoksia taajuudessa.

LCOE

Tasoitettu energiakustannus, kuvaa sähköntuotannon keskimääräisiä nettokustannuksia sen elinkaaren aikana.

mFFR

Manuaalinen säätökauppa

NOIS

Operatiivinen tietojärjestelmä

PHS

Pumppuvesivarasto

PPA

Pitkäaikainen sähkön ostosopimus (Power purchase agreement)

Onshore

Maalle rakennettu tuulivoimala

Offshore

Merelle rakennettu tuulivoimala

Pullonkaula

Sähkön siirto ei onnistu markkina alueelta toiselle siirtorajoitusten takia

Spot Fi

Elspot-markkinoilla määräytyvä hinta Suomen ilmoitusalueelle.

Systemihinta

Nord Pool Spotin Elspot-markkinoilla määräytyvä hinta, jossa verkon fyysistä siirtokykyä ei huomioida.

Syöttötariffi

Tariffin tarkoitus on taata sähköntuottajalle sähköstä ennalta sovittu hinta, jonka tuottaja saa.

Säätösähkö

Fingridin esittämän säätöpyynnön seurauksena Fingridin ja säädön toteuttajan väliseen sähköntoimitukseen liittyvä sähköenergia. Säätöenergian määrä lasketaan säätötehon ja käyttöajan tulona. Säätösähkökauppa Aktivoidusta säätötarjouksesta syntyy Fingridin ja säätävän osapuolen välille säätösähkökauppa.

Säätösähkökauppa

Aktivoidusta säätötarjouksesta syntyy Fingridin ja säätävän osapuolen välille säätösähkökauppa. Säätösähkömarkkinat Tehotasapainon ylläpitämiseksi tarvittava "työkalu", jonne säätökykyisen kapasiteetin haltijat voivat jättää säätötarjouksia vapaasta säätökapasiteetistaan. Suomen säätösähkömarkkinat ovat osa pohjoismaisia säätösähkömarkkinoita.

Säätötarjous

Fingridin ylläpitämille säätösähkömarkkinoille jätetty tarjous säätökykyisestä kapasiteetista (tuotanto ja kulutus).

Taajuuspoikkeama

Taajuuspoikkeama Nimellistaajuuden ja todellisen taajuuden välinen ero. Normaaleissa käyttöolosuhteissa taajuuden sallitaan vaihtelevan välillä 49,9–50,1 Hz.

Tasesähkö

Osapuolen tunnin aikana syntyneen tasepoikkeaman kattamiseen käytettävä sähköenergia, jonka osapuolen avoin toimittaja toimittaa kyseiselle osapuolelle avoimella toimituksella.

Tuotantotase

Tuotantotase muodostuu tasevastaavan kokonaistuotantosuunnitelmasta, toteutuneesta tuotannosta sekä tuotantotaseen tehokaupoista.

Volyyimiriski

Tuotetun ja ennustetun sähkömäärän vaihtelun aiheuttama riski

vRES

Vaihteleva uusiutuva energia

Ylös säätö

Manuaalinen säätötuote ylös säädölle

Ylös säätötarjous

Säätösähkömarkkinoille annettava tarjous tuotannon lisäämisestä tai kulutuksen pienentämisestä. Tarjouksen aktivoituessa säädön toteuttaja myy säätösähköä Fingridille.

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	12
2	Tuulivoima maailmassa.....	14
3	Pohjoismaiset sähkömarkkinat	17
3.1	Nord Pool	18
3.1.1	Elspot hinnan muodostuminen.....	18
3.1.2	Aluehinnan muodostuminen	19
3.1.3	Systemihinta.....	20
3.1.4	Intraday	21
3.2	Suomen sähköverkon reservimarkkinat	21
3.2.1	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D)	23
3.2.2	Nopea taajuusreservi (FFR)	24
3.2.3	Automaattinen taajuuden hallintareservi (aFFR).....	25
3.2.4	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat	26
3.2.5	Säätötarjoukset	26
3.3	Mikä on inertia ja sen vaikutukset suomen sähköverkkoon.....	27
3.3.1	Inertia pohjoismaissa	29
4	Tuulivoima suomessa.....	31
4.1	Suomen sähköntuotanto verrattuna Tanskaan ja Ruotsiin	34
4.2	Tuulivoimala.....	37
4.2.1	(LCOE) Tasoitettu energian kustannus.....	39
4.3	Tuulen ennustettavuus Suomessa	40
4.3.1	Tuuliatlas	40
4.4	Tuulivoimaloiden sijainti Suomessa	42
5	Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden varautuminen tuulivoiman lisääntymiseen	45
5.1	Tuulivoiman vaikutuksiin markkinoilla liittyvät tutkimukset	48
5.2	Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden näkymät	49
6	Tuulivoiman lisääntymisen vaikutukset Suomen säätösähkömarkkinoihin	50
6.1	Suomen sähköjärjestelmä	51
6.2	Säätövoima.....	51
6.3	Tuulivoiman vaikutukset säätösähkömarkkinoihin.....	52
6.4	Tuulivoima tuotannon ennusteen onnistuminen	56

6.5	Mihin vuodenaikaan säätökauppaa käydään aktiivisimmillaan?.....	57
6.6	Toteutuneiden säätötarjouksien määrä	59
6.7	Toteutuneiden säätösähkö tarjouksien koko.....	60
6.8	Säätöelektroniikan alas ja ylös säädetyt (€/MW) arvon määrittäminen.....	62
6.9	Säätöelektroniikan alas ja ylös säädetyt (€/MWh) arvon määrittäminen	65
7	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	68
	Lähteet	71

Kuvaluettelo

KUVA 1 MAAILMAAN ASENETTAVAN ONSHORE TUULIVOIMAN KEHITYS GW. (IRENA, 2018).....	15
KUVA 2 MAAILMAAN ASENETTUN OFFSHORE TUULIVOIMAN KEHITYS GW. (IRENA, 2018).....	16
KUVA 3 POHJOISMAISEN SÄHKÖMARKKINAN ALUEET. (NORD POOL 2020B)	17
KUVA 4 SÄHKÖN HINNAN MUODOSTUMINEN (NORD POOL, 2020A).....	19
KUVA 5 SUOMEN ALUEHINNAN JA SYSTEEMIHINNAN EROTUS €/MWH	20
KUVA 6 FINGRID RESERVILAJIT (FINGRID, 2022A)	22
KUVA 7 MITÄ YLÖS JA ALAS SÄÄTÖTARJOUKSET TARKOITTAVAT (FINGRID, 2022A)	27
KUVA 8 INERTIAN VAIKUTUS HÄIRIÖTILANTEESSA (FINGRID, 2018A).....	29
KUVA 9 ALUEET, JOISSA INERTIAN TUOTANTO ON SUURINTA POHJOISMAISSA (FINGRID, 2018A)	30
KUVA 10 TUULIVOIMAN TUOTANNON OSUUS SÄHKÖNKULUTUKSESTA (%).....	32
KUVA 11 TUULIVOIMAN ASENETTU JA TUOTANTO KAPASITEETTI (ENERGIATEOLLISUUS RY, 2022B).....	33
KUVA 12 SUOMEEN VALMISTUVAT TUULIVOIMALAT 2019–2025 (TUULIVOIMAYHDISTYS, 2022A)	34
KUVA 13 TUOTANTOMUODOT ERI MAISSA: POHJOISMAAT KOKONAISUUDESSA, RUOTSI, SUOMI JA TANSKA. (SPODNIAK ET AL., 2021).....	35
KUVA 14 TUULIVOIMAN KAPASITEETTI JA TUOTANTO (SPODNIAK ET AL., 2021).....	36
KUVA 15 ASENETTUVIEN VOIMALOIDEN KESKIMÄÄRÄINEN NAPAKORKEUS (FCG, 2021)	38
KUVA 16 TUULIVOIMALAN OSAT (MOTIVA, 2022)	39
KUVA 17 TUULIATLAKSEEN VALITUT TARKEMMAT ALUEET (TUULIATLAS, 2010)	41
KUVA 18 KESKIMÄÄRÄINEN TUULENNOPEUS 1–1,5 KILOMETRIN KORKEUDESSA EUROOPASSA. (TUULIATLAS, 2010)	41
KUVA 19 KESKIMÄÄRÄISET TUULENNOPEUDET ERIPUOLELTA SUOMEA (TUULIATLAS, 2010).....	42
KUVA 20 SUOMEN TUULIVOIMALAT (TUULIVOIMAYHDISTYS, 2022A)	43
KUVA 21 RAKENTEILLA OLEVAT TUULIPUISTOT SUOMESSA (TUULIVOIMAYHDISTYS, 2022A)	43
KUVA 22 SUOMEN SÄHKÖN KULUTUS ENERGIALÄHTEITTÄIN VUONNA 2021 (ENERGIATEOLLISUUS RY, 2022)	50
KUVA 23 ALAS SÄÄTÖHINNAT SÄÄSTÖSÄHKÖ MARKKINOILLA.....	54
KUVA 24 YLÖS SÄÄTÖHINNAT SÄÄTÖSÄHKÖ MARKKINOILLA.....	55
KUVA 25 NEGATIIVISET HINNAT SÄÄTÖSÄHKÖMARKKINOILLA	55
KUVA 26 TUULIVOIMA TUOTANNON JA ENNUSTEEN ONNISTUMINEN VALITULLA TARKASTELUJAKSOLLA KESKIMÄÄRÄISEN TUOTANNON JA ENNUSTEEN MUKAAN.	56
KUVA 27 MANUAALISEN SÄÄTÖSÄHKÖN MÄÄRÄT KVARTAALIKOHTAISESTI (H)	58
KUVA 28 TUULIVOIMAN TUOTANTO KVARTAALITTAIN KESKIMÄÄRÄINEN (MWH).....	59
KUVA 29 TOTEUTUNEIDEN YLÖS ALAS SÄÄTÖJEN MÄÄRÄ VUOSITTAIN	60
KUVA 30 KESKIMÄÄRÄINEN TOTEUTUNEEN ALAS-SÄÄDETYN SÄHKÖN MÄÄRÄ VUOSINA 2017–2021 (MW).....	61
KUVA 31 KESKIMÄÄRÄINEN TOTEUTUNEEN YLÖS-SÄÄDETYN SÄHKÖN MÄÄRÄ (MW).....	61
KUVA 32 ALASSÄÄDÖN KESKIMÄÄRÄINEN €/MW KOHDEN.....	64
KUVA 33 YLÖS-SÄÄDÖN KESKIMÄÄRÄINEN €/MW KOHDEN	65
KUVA 34 TOTEUTUNUT KESKIMÄÄRÄINEN HINTA, ALAS-SÄÄDETTY €/MWH	66
KUVA 35 TOTEUTUNUT KESKIMÄÄRÄINEN HINTA, YLÖS-SÄÄDETTY €/MWH	67

Taulukkuuettelo

TAULUKKO 1 TAAJUUDEN VAKAUTUSRESERVIN (FCR) TEKNISET VAATIMUKSET (FINGRID, 2022B)	23
TAULUKKO 2 NOPEAN TAAJUUS RESERVIN VUOSI- JA TUNTIMARKKINOIDEN PERIAATTEELLISET EROT (FINGRID, 2020)	24

1 Johdanto

Suomen sähkön tuotanto tuulivoimalla on lisääntynyt viime vuosina paljon ja nopeasti. Tuulivoiman syöttötariffin käyttöön ottaminen 2010-luvulla lisännyt tuulivoimalla tuotetun sähkön määrää nopeasti. Syöttötariffin ansiosta nykyiset tuulivoimalat ovat muuttuneet markkinaehtoisiksi. Tuulivoiman lisääntynyt määrä vaikuttaa myös sähkömarkkinoiden toimintaan ja aiheuttaa muutoksia kaikille sähkömarkkinoilla toimiville osapuolille. Sähkömarkkinoita ohjataan monella eri tavalla, lainsäädäntö, regulaattorit, sekä energiapolitiikka ovat sähkömarkkinoihin eniten vaikuttavia tekijöitä. Nopeat muutokset markkinoilla aiheuttavat toimijoille riskejä, joiden hallintaan on jatkuvasti tehtävä muutoksia, jotta markkinoiden riskit eivät eskaloitu tulokseen. Energia markkinan muutoksista aiheutuu paljon työtä ja nykyisin selkeän pitkätähtäimen suunnitelman tekeminen on erittäin vaikeaa. Uusien laitoksien toimitusajat sekä takaisinmaksuajat ovat pitkiä ja lainsäädännön muutokset entisestään vaikeuttavat niiden tekemistä. Nykyisin olemme myös huomanneet, että politiikka aiheuttaa nopeita muutoksia, joihin on haastava reagoida. Olemme huomanneet, että maailmassa täytyy olla koko ajan valppaana ja kansallisesti tuotetun energian varmistaminen on entistä tärkeämpää, jotta voimme varmistua siitä, että kansalaisilla on mahdollisuus saada sähköä vuorokauden jokainen tunti.

Kantaverkkoyhtiöillä on entistä tärkeämpi rooli uusiutuvan energian mukana tuomien sääriippuvaisten tuotantomuotojen takia, jolloin kantaverkkoyhtiön haasteet sähkön taseen hallinnassa ovat entistä tärkeämmässä roolissa. Tuotantoennusteet, niiden paikkansa pitävyys ja hallinta muuttavat kantaverkkoyhtiön toimintaa nopeasti.

Tässä työssä keskitytään yhteen kantaverkkoyhtiön kanssa tehtävään manuaaliseen säätökauppaan (mFFR). Tutkimuksessa pyritään selvittämään kvartaalitasolla, voidaanko suomen säätökapasiteettimarkkinoilla tehdä huomio, että kasvaneet tuulivoiman tuotantomäärät vaikuttaisivat säätökapasiteettimarkkinoiden määrään sekä maksettaviin korvauksiin. Tutkimuksessa vuosi on jaettu neljään yhtä pitkään jaksoon, jotta voidaan tehdä vertailua eri vuodenaikojen vaikutuksesta manuaaliseen säätökauppaan. Ensimmäinen jakso on tammikuun ensimmäisestä päivästä maaliskuun viimeiseen päivään (Q1). Toinen jakso on huhtikuun ensimmäisestä päivästä, kesäkuun viimeiseen päivään (Q2). Kolmas jakso on heinäkuun ensimmäisestä päivästä syyskuun viimeiseen päivään (Q3) ja viimeinen jakson on lokakuun ensimmäisestä päivästä joulukuun viimeiseen päivään (Q4).

Työn alkuvaiheessa tutustutaan yleisesti sähkömarkkinoihin ja markkina-alueisiin. Siihen mistä sähkömarkkinat koostuvat ja millaisiin markkina-alueisiin pohjoismaat on jaettu.

Seuraavaksi tutustutaan Suomen sähköverkon reservituotteisiin, mitä reservimarkkinat pitävät sisällään ja millaisia tuotteita suomessa on tällä hetkellä käytössä. Tämän jälkeen käydään lävitse vertailuna, miten energiaa tuotetaan muissa pohjoismaissa ja lisäksi sivutaan säätömarkkinoista tehtyjä tutkimuksia.

Työssä käydään lävitse tuulivoiman globaalit tuotantomäärät, tulevaisuuden näkymiä sekä lyhyesti kerrotaan, kuinka tuulivoimala toimii sekä tutustutaan tuulivoimalan tärkeimpiin komponentteihin.

Tutkimusosassa on käsitelty tarkemmin vuosien 2017–2020 tuulivoiman tuotantoa ja sen vaikutuksia säätösähkömarkkinoiden käyttäytymiseen tuulivoiman lisääntymisen takia. Lopun yhteenvedossa tutkitaan mitä asioita nousee esille ja antaako tutkimus vastausta tuulivoiman vaikutuksista säätösähkömarkkinoiden toimintaan. Tuulivoiman haastavan ennustettavuuden takia, tuulivoiman tuotannon määrän kasvaessa myös edellisenä päivänä tehtävä Spot-tarjous on vaikeampi toteuttaa; sään muuttuminen tai ennustaminen vaikuttaa tuulivoiman määrään, jolloin myös sähkön tuotantoennuste voi muuttua sään muutoksien takia. Tämän takia myös tuulivoiman vaikutus säätökauppaan voisi lisääntyä.

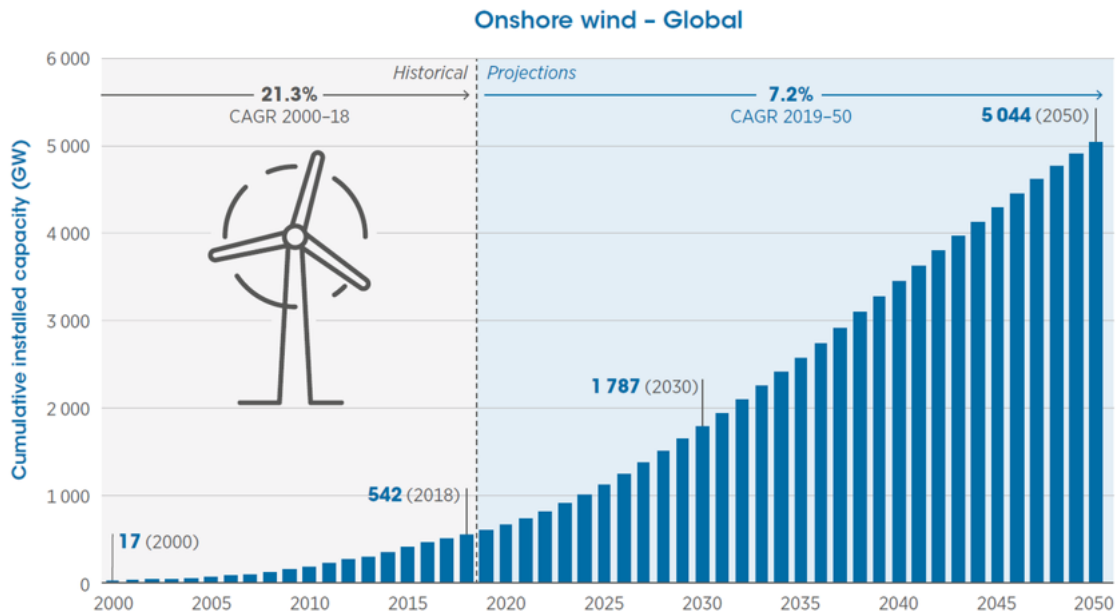
Tarkoituksena on löytää Findgridin tarjoamasta avoimesta datasta tuulivoiman yhteys toteutuneeseen ylös säädön ja alas säädön hintaan. Onko tuulivoiman ennusteella ja toteutuneella tuotannolla vaikutusta toteutuneisiin Findgridin ylös tai alas säädön hintoihin. Onko Suomessa tuotettu tuulivoima niin merkittävää, että sillä olisi vaikutusta Suomen sisäisillä sähkömarkkinoilla säätösähkömarkkinoihin.

2 Tuulivoima maailmassa

Globaalisti tuulivoiman osuus sähköntuotannosta on lähtenyt selkeään kasvuun vuodesta 2000. Ennen vuotta 2000 energiantuotannosta uusiutuvaa on ollut noin 20 % ja se on lähes kokonaisuudessaan tuotettu vesivoimalla. Viimeisten kahden vuosikymmenen aikana tuulivoima tuotannon osuus on kasvanut noin viiteen prosenttiin. Viime vuosina uusiutuvan energian asennusmäärät ovat ohittaneet fossiilisen tuotannon asennusmäärät (IRENA 2019). 2020 vesivoiman osuus uusiutuvan energian lähteenä on suurin mutta ennusteiden mukaan vuoteen 2050 mennessä tuulivoima tuotannon osuus maailman energian tuotannosta nousisi jopa 25 prosenttiin. Myös aurinkoenergian tuotannon määrä kasvaa ennusteiden mukaan ja sitä tulisi olemaan asennettuna lähes yhtä paljon kuin tuulivoimaa. Kaasulla tuotetun energian määrän kasvu on jo laskemaan päin ja sen osuus kokonaistuotannosta pienenee hieman vuoteen 2050 mennessä. Eniten 2050 mennessä pienenee hiilellä tuotetun energian määrä ja öljyllä tuotettu energia loppuu lähes kokonaan vuoteen 2025 mennessä. Vuonna 2050 uusiutuvan energian määrä maailmassa on jo yli 60 prosenttia ja fossiilisten osuus pienenee 30 prosentin tuntumaan. Loput energiasta tuotettaisiin ydinvoimalla. Raportissa on hyvä ottaa huomioon myös, että maailman sähkönkulutus nousee vuoteen 2050 mennessä merkittävästi. Eli siis fossiilisen tuotannon määrä voi kasvaa absoluuttisesti mutta osuus kokonaistuotannosta voi pienentyä. Vesivoimalla tuotetun sähkön määrä kasvaa hieman absoluuttisesti vuoteen 2050 mutta kokonaissähkön kulutuksessa sen osuus ei juurikaan muutu. (BloombergNEF 2019, Bloomberg 2019) Vuosien 2010–2019 välillä uusiutuvan energian investointeihin on käytetty globaalisti 2,6 biljoonan Yhdysvaltain dollaria. Vuodesta 2019 vuoteen 2050 uusiutuvan energian sähköntuotantoon investoidaan maailmanlaajuisesti 13,3 biljoonaa dollaria ja tästä summasta tuulivoiman kasvuun käytetään arvioiden mukaan 5,3 biljoonaa eli noin 40 prosenttia kokonaisinvestoinneista. Tämä määrä nostaisi tuulivoiman eniten rahaa investoitavaksi tuotantomuodoksi. (BloombergNEF 2019, Bloomberg 2019).

Seuraavaksi tarkastellaan tuulivoiman absoluuttista kehitystä. Maailman tuulivoiman määrä on noussut vuodesta 2015 vuoteen 2018 n. 50 000 MW vuosittain. Vuosien 2014–2015 aikana maailmaan asennettiin lähes 64 000 MW lisää tuulivoima kapasiteettia ja maailman asennetun tuulivoiman kumulatiivinen määrä vuonna 2018 oli jo 600 000 MW. Onshore ennustetaan kasvavan 7,2 % vuosittain välillä 2018–2050, tällöin tuulivoiman määrä kaksinkertaistuu joka kymmenes vuosi ja vuonna 2030 kapasiteettia olisi lähes 1800 GW eli lähes kolme kertaa enemmän kuin vuonna 2018.

Kuvasta 1 huomaamme, että vuoteen 2050 mennessä onshore tuulivoiman odotetaan lähes kymmenkertaistuvan ja asennetun tuulivoiman määrä olisi yli 5000 GW. (IRENA 2019)



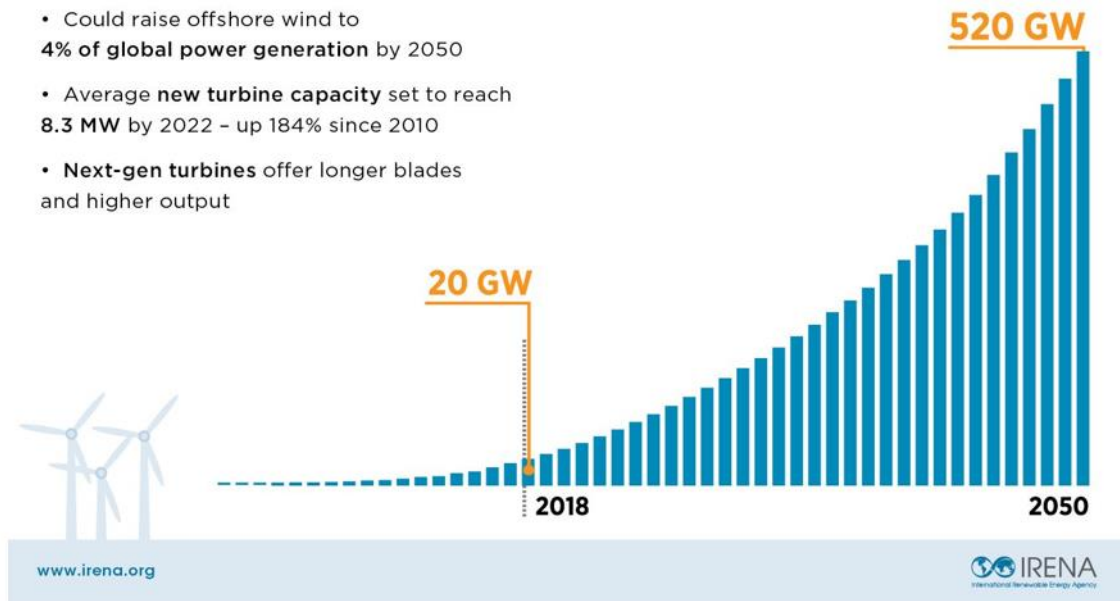
Kuva 1 Maailman asennettavan onshore tuulivoiman kehitys GW. (IRENA, 2018)

Kiinassa tuotetaan tuulivoimalla eniten sähköä maailmassa. Seuraavaksi eniten sitä tuotetaan Yhdysvalloissa, Saksassa sekä Intiassa. Kiinassa myös rakennetaan eniten uutta tuulivoima kapasiteettia maailmassa ja sen osuus tuulivoimatuotannosta kasvaa koko ajan. Vuonna 2018 kiinan osuus maailman tuulivoimakapasiteetista oli n. 36 %. Euroopan suurimpia tuulivoiman tuottajia ovat Saksa, Espanja, Iso Britannia sekä Ranska.

Kuvassa 2 on esitetty maailman offshore tuulivoiman määrää, jota oli vuonna 2018 asennettuna jo noin 20 000 MW ja sen kokonaisosuus maailman asennetusta tuulivoimasta on vajaa 4 %. Eurooppaan on rakennettu miltei kaikki maailman offshore tuotanto. Offshore tuulivoiman kapasiteetti kasvaa vuosittain n. 30 % vuosivauhdilla. IEA tekemän ennusteen mukaan offshore tuulivoima 26 kertaistuu vuoteen 2050 mennessä ja varsinkin Euroopassa sen arvellaan kasvavan suuremmaksi kuin onshore tuotannon. (WWEA 2018, IEA 2019)

Offshore wind capacity set to reach 520 GW by 2050

- Could raise offshore wind to **4% of global power generation** by 2050
- Average **new turbine capacity** set to reach **8.3 MW** by 2022 – up 184% since 2010
- **Next-gen turbines** offer longer blades and higher output



Kuva 2 Maailman asennetun offshore tuulivoiman kehitys GW. (IRENA, 2018)

Vuonna 2000 merituulivoimaa oli maailmassa asennettuna vain 0,1 GW. Vuoden 2000 jälkeen merituulivoiman kapasiteetti on kasvanut yli 38 % vuosittain ja vuonna 2018 sitä oli asennettuna 23 GW. Kuten kuvasta huomaamme myös merituulivoiman kapasiteetin kasvu on ennustettu erittäin nopeaksi. Ennusteen mukaan vuonna 2050 sitä olisi jo 520 GW. Myös merituulivoimalan keskiteho on kasvanut yli 8 MW per yksikkö (2022), joka on lähes 200 % suurempi kuin vuonna 2010. Maailman tuulivoiman kokonaistuotannon kapasiteetin ennustetaan olevan vuonna 2050 siis 5500 GW. (IRENA, 2019)

3 Pohjoismaiset sähkömarkkinat

Sähkömarkkinoilla toimitaan kahdella eri tavalla. On sekä fyysiset, että finanssimarkkinat. Näiden markkinoiden suurimmat erot ovat, että fyysisillä sähkömarkkinoilla sähkön toimitus tapahtuu konkreettisesti, kun taas finanssimarkkinoilla vain raha vaihtaa omistajaa. Finanssimarkkinoilla pyritään turvaamaan sähkön hinta tietylle tasolle pitkälle tulevaisuuteen. Fyysiset markkinat pitävät sisällään intraday ja Day-ahead markkinat. Day-ahead kaupassa käydään kauppaa seuraavalle vuorokaudelle ja tätä kutsutaan elspot kaupaksi. Kun taas Intraday-kauppa käydään vuorokauden sisällä ja tätä kutsutaan Elbas kaupaksi. Elspot kaupan perusteella tehdään ensimmäinen verkon tasapainotus. Intraday ja säätösähkömarkkinat turvaavat loput lähempänä kulutushetkeä olevat kuopat, jotta verkon taajuus pysyy koko ajan tasapainossa ja 50 Hz:n taajuudessa.

Sähkön kaupankäynti eroaa suuresti muista hyödykemarkkinoista koska sähkön varastointi suuressa mittakaavassa on vielä nykyisin mahdotonta. Lisäksi jokaisella valtiolla on oma kantaverkko-yhtiö (Suomi Fingrid, Ruotsi Svenska Kraftnät, Norja Statnett ja Tanska Energinet), jotka ylläpitävät oman maansa säätösähkömarkkinoita. Säätösähkömarkkinoiden tärkeys on vielä nykypäivänä suuri, sillä kulutuksen ja tuotannon pitävät olla tasapainossa joka hetki (Nord Pool, 2020a).



Kuva 3 Pohjoismaisen sähkömarkkinan alueet. (Nord Pool 2020b)

3.1 Nord Pool

Nord Pool on Euroopan sähkömarkkinoiden johtava sähkömarkkinapaikka, joka tarjoaa kaupankäynti-, selvitys, toimituspalveluja sekä vuorokausi, että päivänsisäisillä markkinoilla. Nord Poolissa käydään sähkön fyysistä kaupankäyntiä. Nord Pool tarjoaa kauppapaikan sekä tunti hintaiselle sähkölle elspot, että seuraavan vuorokauden markkinoille elbas. Nord Pool toimii yli 16 Euroopan maassa ja on suurin toimija varsinkin Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Nord Poolin avulla sähkön myyjät, sekä ostajat käyvät kauppaa sähkön tuotteista ja Nord Pool on kaikkien kauppajien vastapuolena. Nord Poolin omistavat pohjoismaiset sekä Baltian kantaverkkoyhtiöt. Kauppaa voidaan käydä 0,1 MWh:n kiinteän sähkön toimitussopimuksista alkaen. (Nord Pool, 2020b)

3.1.1 Elspot hinnan muodostuminen

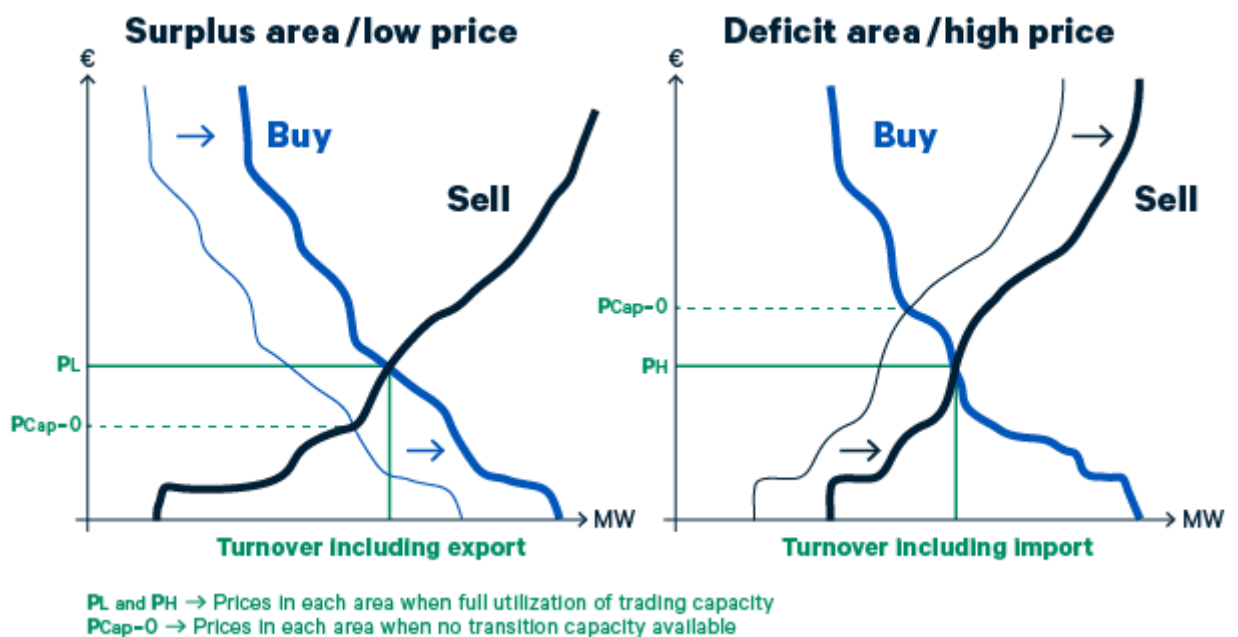
Elspot hinta muodostuu seuraavalle vuorokaudelle tunneittain edellisinä päivänä jätettyjen ostojen ja myyntitarjousten perusteella. Seuraavan vuorokauden elspot-hinnat julkistetaan viimeistään edellisenä päivänä klo 14.00 Suomen aikaa. Tarjoukset pitää olla jätettynä klo 13.00 mennessä, jolloin seuraavan päivän markkina sulkeutuu. Tarjouksien hinnat pitävät olla -500 ja 3000 €/MWh välillä, jotta ne otetaan mukaan tarjoukseen. Tarjoukset pyöristetään 0,1 MWh ja 0,1 € tarkkuuteen. Markkinoille tarjottu sähkön myyntitarjoukset ilmoitetaan negatiivisena MWh-määränä ja ostotarjoukset ilmoitetaan positiivisena MWh määränä. Markkinalle voidaan jättää kahdenlaisia tarjouksia elspot ja blokkitarjouksia. Elspot-tarjous pitää sisällään kaikki vuorokauden tunnit (24 h). Jokaiselle tarjotulle tunnille pitää antaa volyyymi (määrä) ja hinta (€/MWh).

Elspot-markkinoilla on myös mahdollisuus käydä blokkikauppaa. Blokkitarjouksen ehtona on, että blokki on pakko jättää vähintään 3 tunniksi kerrallaan. Blokkitarjouksessa sähkön tuottaja on valmis tuottamaan ennalta määrittelemänsä ajan sähköä ennalta määritettyyn hintaan. Blokkitarjous joko toteutuu kokonaan ennalta määritetyksi ajankohdaksi tai ei ollenkaan ennalta määritettyyn hintaan.

Markkinoille voi jättää myös edellisten tarjouksien kaltaisia yhdistelmätarjouksia, jotka sisältävät sekä osto-, että myynti komponentteja. Myös erilaiset hintaportaat ovat mahdollisia, jossa tarjoaja on valmis tuottamaan tietyn määrän sähköä ennalta määritettyyn hintaan tai muuttamaan tarjouksen volyyymiä, jos hinta muuttuu. Tarjouksen ei tarvitse olla kiinteä vaan sähköntuottaja voi tarjota

sähkön myynnille useampaa hintaporrasta, jolloin sähköntuottaja on valmis muuttamaan omaa tuotantoansa toteutuneiden hintojen mukaan. Jos sähköntuottajan tarjous ei sisällä hintaportaita, sähköntuottaja on valmis tuottamaan sovitun MWh määrän ja tällöin sähkönhinta voi vaihdella välillä -500 €/MWh ja 3000 €/MWh. Sähkön toimittajalla on velvollisuus toimittaa sopimuksen mukaan asiakkaalle sähkön, vaikka hinta markkinoilla nousisi erittäin korkeaksi.

Kun kauppapaikka sulkeutuu klo 13 suomen aikaa, hinnan muodostusalgorithmi laskee jokaiselle tarjousalueelle omat hinnat vuorokauden jokaiselle tunnille. Jokaisen alueen myynti- ja ostotarjouksista tehdään kysyntä- ja tarjouskäyrä, joka muodostetaan laittamalla myyntitarjoukset järjestykseen kalleimmasta halvimpaan. Kaikkien alueiden kysyntä- ja tarjouskäyrien leikkauspisteestä muodostuu joka tunnille systeemihinta. Systeemihinta kuvaa koko markkinalle jätettyjä osto- ja myyntitarjouksia (Kuva 4). (Nord Pool, 2020a)



Kuva 4 sähkön hinnan muodostuminen (Nord Pool, 2020a)

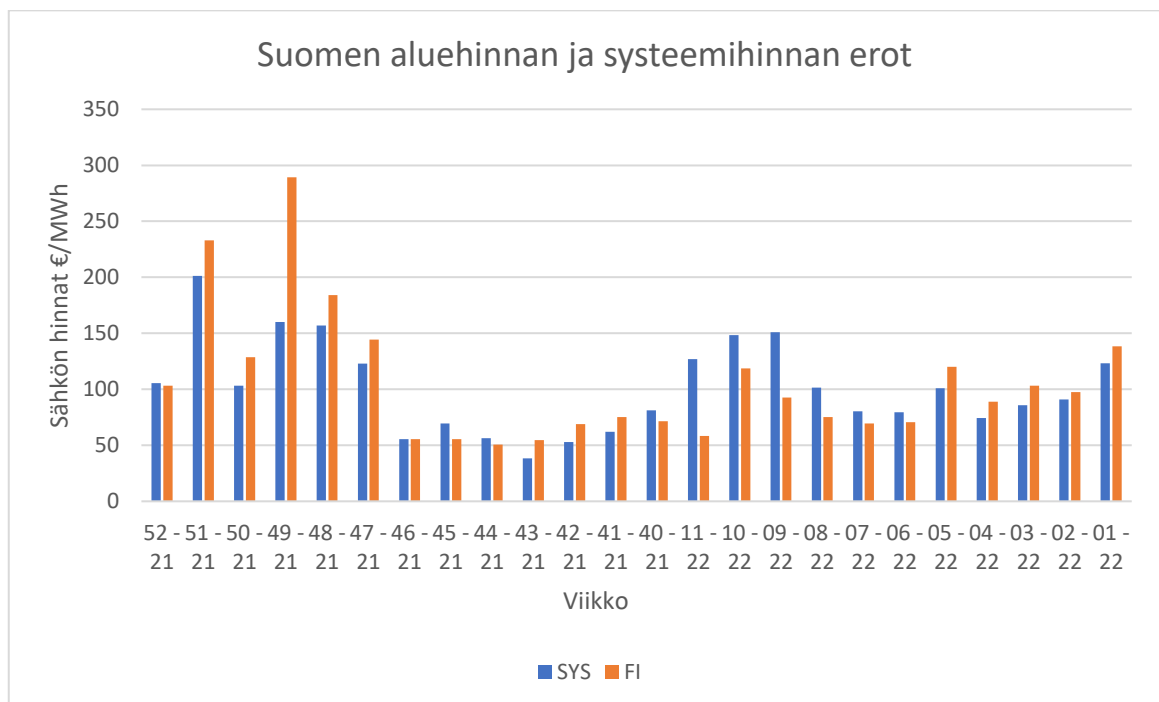
3.1.2 Aluehinnan muodostuminen

Kantaverkko-operaattorit jakavat pohjoismaiden alueet ja Baltian tarjousalueiksi (kuva 1). Näiden tarjousalueiden sisällä voi olla sähkön ali- tai ylijäämä. Sähkö kulkee halvemmalta tarjousalueelta

kalliimman aluehinnan suuntaan koska sähköntuottajat saavat paremman hinnan myymästään sähköstä kuin omalla tarjousalueella. Mikäli tarjousalueiden väliset siirtoyhteydet eivät pysty siirtämään kaikkea tarvittavaa sähköä alueiden välillä, niin tämä johtaa alueiden hintojen väliseen eroon (pullonkaula tilanne). Jos taas verkon siirtoyhteydet ovat riittävät, silloin myös alueiden väliset hinnat pysyvät samana. Kaikki sähköntuottajat saavat tuottamastaan sähköstä saman hinnan, myös kuluttajat maksavat sähköstä saman hinnan. Kun aluehinta ja systeemihinta ovat samat, kaikki kuluttajat alueesta riippumatta maksavat sähköstään saman hinnan. Mikäli tapahtuu poikkeama niin silloin tuottajat saavat ja kuluttajat maksavat kyseisen alueen aluehinnan. (Nord Pool, 2020c)

3.1.3 Systeemihinta

Systeemihinta on Pohjoismaiden rajoittamaton hinta; tässä hinnassa ei ole otettu huomioon minikäänlaisia verkon rajoituksia, vaan ne ovat laitettu äärettömäksi, jolloin systeemihinta ottaa huomioon vain kaikki jätetyt osto- ja myyntitarjoukset. (Nord Reg, 2019) Kuvassa 5 on esitetty Suomen aluehinnan ja systeemihinnan erot markkinoilla vuoden 2021 syksystä maaliskuulle 2022. Kuvassa 5, FI tarkoittaa suomen aluehintaa ja SYS tarkoittaa markkinoiden systeemihintaa. Selkeimmät verkon rajoitukset ovat olleet viikolla 49, jolloin suomen aluehinta on ollut lähes kaksi kertaa korkeampi kuin Nord poolin systeemihinta.



Kuva 5 Suomen aluehinnan ja systeemihinnan erotus €/MWh

3.1.4 Intraday

Intraday tarkoittaa päivän sisäistä kaupankäyntiä sähkömarkkinoilla. Markkinapaikka antaa mahdollisuuden markkinoilla toimijoille tasapainottaa omaa sähkön tuotantoa ja kulutusta. Tämä tukee sähköjärjestelmän tasapainoa. Intraday-markkina on auki 24/7 jokaisena vuoden päivänä. Suomessa kaupankäynti on mahdollista Viron kanssa 30 minuuttia ennen kuin kaupankäyntikohteen tunti alkaa. Suomen ja ruotsin välillä kaupankäynti sulkeutuu 60 minuuttia ennen kuin kaupankäynti tunti alkaa. Tulevaisuudessa myös intraday kaupankäynnin merkitys kasvaa entisestään, kun säästä riippuvan tuotannon osuus (tuuli ja aurinkovoima) kasvaa. Findgridin tarkoitus on edistää entisestään intraday-kaupankäynnin alustaa, joka lisäisi markkinaehtoisuutta ja lisäisi sähköllä käytävää kauppaa lähemmäs toteutumishetkeä. (Fingrid, 2019)

3.2 Suomen sähköverkon reservimarkkinat

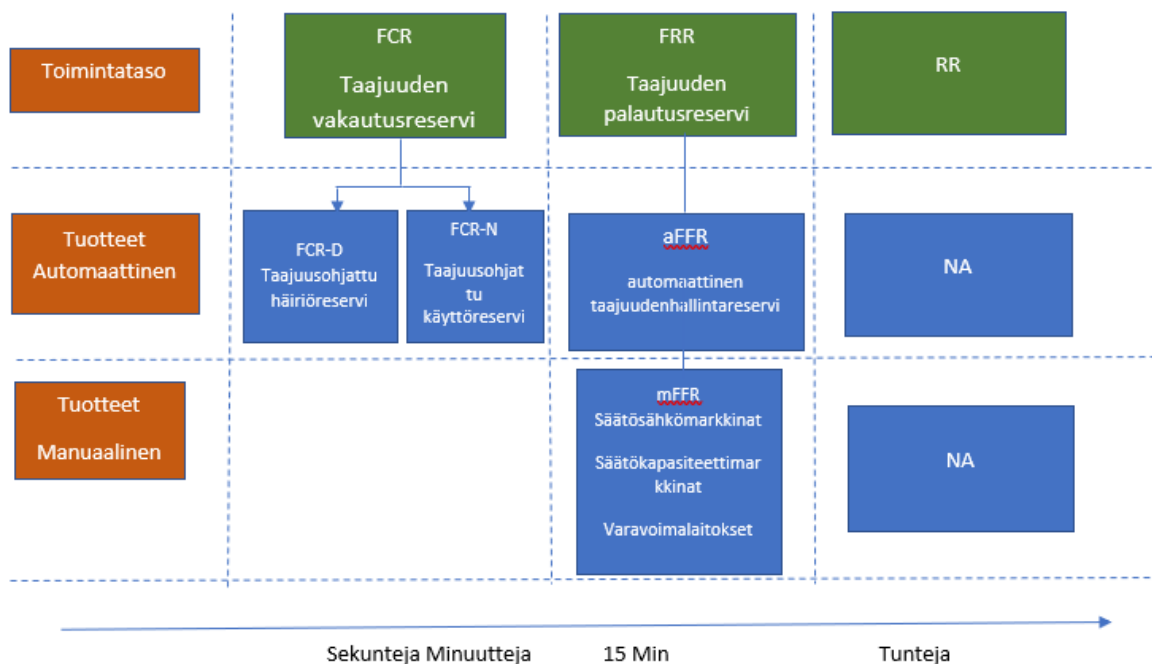
Sähköverkon reservituotteita on monia erilaisia ja ne voidaan jaotella käyttötarkoituksen perusteella kolmeen eri ryhmään.

Ensimmäisessä ryhmässä on taajuuden vakautusreservit, joita käytetään jatkuvaan sähköverkon taajuuden hallintaan. Toisessa ryhmässä on taajuuden palautusreservit. Palautusreservien tarkoitus on palauttaa taajuus normaalille taajuus alueelle (49,9–50,1 Hz) ja niiden avulla voidaan palauttaa aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön. Kolmannessa ryhmässä ovat korvaavat reservit, jolla valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin mahdollisiin uusiin vikatilanteisiin. Näiden avulla palautetaan aiemmin aktivoituneet taajuuden palautusreservit takaisin valmiuteen. Näitä ei käytetä pohjoismaisissa sähköjärjestelmissä. Sen sijaan pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla on vuodesta 2020 alkaen käytössä nopea taajuusreservi, jota käytetään taajuuden hallintaan sekä pienten inertian tilanteissa vakautusreservien lisänä. (Fingrid, 2022a)

Suomen sähköverkon tuotannon ja kulutuksen tulee olla joka hetki tasapainossa eli sähköä pitää tuottaa vuoden jokaisena hetkenä yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Sähköverkon tasapaino tilanteessa sähköverkon taajuus on 50,0 Hz. Sähkömarkkinoilla toimivat osapuolet suunnittelevat etukäteen heidän kulutuksensa sekä tuotantonsa tasapainoon. Jos suunnitelmassa tulee käyttötunnin aikana poikkeamia, silloin tasapainon saavuttamiseksi tarvitaan reservit, jotka Fingrid on

hankkinut ylläpitämiltään markkinoilta. Sanalla reservi tarkoitetaan voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja, jotka joustavat eli muuttavat tehoaan verkon tasapainon säilyttämiseksi.

Pohjoismaisia reservivelvoitteita (Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska) velvoittaa yhteiskäyttöjärjestelmässä sovittu järjestelmävastaavien sopimus. Sopimuksessa taajuusohjattua käyttöreserviä ylläpidetään vuoden jokaisena hetkenä 600 MW tehoa normaalitilan taajuudensäädön saavuttamiseksi. 600 MW taajuusohjatun häiriöreservin määrä on sellainen, jolla voidaan säätää yksittäisen vian aiheuttama korkeintaan 0,5 HZ taajuuspoikkeama sähköjärjestelmässä. Tämän reservin määrä on mitoitettu suurimaan yksittäisen vian perusteella molempiin suuntiin (ali- ja ylitaajuushäiriötä varten). Alitaajuushäiriön voi aiheuttaa esimerkiksi ison tuotantolaitoksen tai vastaavasti ison siirtoyhteyden tuovan johdon irtoaminen verkosta. Tällä hetkellä suurin ali- tai ylitaajuushäiriötä varten tarvitaan 1400 MW alas säätöä tai ylös säätöä 1450 MW. Pohjoismaissa yhteisesti ylläpidettävät käyttö- ja häiriöreservit jaetaan vuosittain kantaverkko-yhtiöiden kesken pohjoismaiden käyttämien ja tuottamien vuosienergioiden suhteessa. (Fingrid, 2022a)



Kuva 6 Fingrid reservilajit (fingrid, 2022a)

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

Käyttö- ja häiriöreservi ovat säätötuotteita, jotka aktivoituvat automaattisesti taajuudenmuutoksista. Niiden avulla hallitaan jatkuvaa taajuuden muutosta. Taajuusohjatun käyttöreservin tarkoitus on pitää verkon taajuus 49,9–50,1 Hz välillä. Vastaavasti taajuusohjattu häiriöreservi pyrkii pitämään taajuuden yli 49,5 Hz ja korkeintaan 50,5 Hz, kun taajuus poikkeaa normaalista 50,0 Hz. Taajuusohjatun käyttöreservin on pystyttävä sekä ylös- että alas-säätöön. Ylös-säätö tarkoittaa sähkön tuotannon lisäämistä tai kulutuksen pienentämistä ja vastaavasti alas-säätö tarkoittaa joko kulutuksen lisäämistä tai tuotannon vähentämistä. Taajuusohjattu häiriöreservi on jaettu erillisiin ylös- ja alas-säätö tuotteisiin. (Fingrid, 2022b)

Taajuusohjatulla käyttö- ja häiriöreservillä on tarkat tekniset vaatimukset, jotta näitä tuotteita voi tarjota markkinalle. Lisäksi niille täytyy tehdä tarkat säätökokeet, jossa osoitetaan niiden toiminta.

Taulukko 1 Taajuuden vakautusreservin (FCR) tekniset vaatimukset (Fingrid, 2022b)

	Säädön vähimmäiskoko	Aktivoitumisaika	Muuta
Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1 MW	3 min ± 0,1 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella	Kuollut alue Max ± 0,01 Hz
Taajuusohjattu häiriöreservi ylös	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 % Askelmaisella Taajuusmuutoksella 49,9 Hz:stä 49,5 Hz:iin	
Taajuusohjattu häiriöreservi alas	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 % Askelmaisella Taajuusmuutoksella 50,1 Hz:stä 50,5 Hz:iin	

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid hankkii tarvittavan määrän taajuusohjattuja reservejä kotimaisilta vuosimarkkinoilta ja tuntimarkkinoilta markkinaehtoisesti. Lisäksi se voi hankkia niitä Virolta

sekä Pohjoismaista tasasähköyhteyksiltä. Suomessa oleva säätökykyinen kapasiteetti toimittaja voi tarjota kapasiteettiaan vuosi- ja/tai tuntimarkkinoille. Teknisiltä vaatimuksiltaan ei ole eroa tarjotaanko tuotetta vuosi- vai tuntimarkkinalle. (Fingrid, 2022b)

3.2.2 Nopea taajuusreservi (FFR)

Nopeaa taajuusreserviä on tarkoitus hankkia silloin, kun sähköverkolla on tarvetta hallita pieniä inertioita. Tämä riippuu sähköjärjestelmän inertiaasta (viitataan sähköverkossa olevaan liike-energiään kappaleessa 3.3) ja sitä tarvitsee hankkia vain osalle vuorokauden tunneista ja sen hankintamäärä vaihtelee tunnista riippuen. Nopean taajuusreservin hankintamäärä on Pohjoismaissa noin 300 MW. Sähköjärjestelmässä on mitoitusperiaate, jonka mukaan noudatetaan mitoitusta, jossa yhden yksittäisen sähkön tuotantoyksikön tai HVDC- (suurjännitetasavirta) siirtoyhteyden menetys ei saa aiheuttaa taajuuden putoamista alle 49,0 Hz:n tason. Taajuuden putoamisen muutoksen suuruuteen vaikuttaa tehon suuruuden muutos, järjestelmän inertia ja reservien aktivoitumisnopeus. Tarpeen koko häiriöreservin koolle määrittelee tapahtuneen vian suuruus tai inertian määrä. (Fingrid, 2020)

Taulukko 2 Nopean taajuus reservin vuosi- ja tuntimarkkinoiden periaatteelliset erot (Fingrid, 2020)

Vuosimarkkinat	Tuntimarkkinat
Tarjouskilpailu järjestetään kerran vuodessa (syksyllä)	Reservitoimittaja voi osallistua Tuntimarkkinoille tekemällä siitä erillisen sopimuksen Fingridin kanssa, eikä se edellytä vuosisopimuksen tekemistä
Kesken sopimuskauden ei ole mahdollista tulla mukaan reservin ylläpitoon vuosisopimuksella	Tuntimarkkinoille mukaantulo on mahdollista myös kesken vuoden
Reservisuunnitelmien mukainen määrä ostetaan täysmääräisesti	Tarvittava määrä tarjouksia käytetään hintajärjestyksessä periaatteella halvin ensin
Reservisuunnitelmat jätettävä edellisenä päivänä klo 18.00 mennessä	Tarjoukset seuraavan vuorokauden tunneille jätettävä klo 18.30 mennessä
Reservitoimittajalla on velvollisuus ylläpitää vuosimarkkinoille myymäänsä reserviä vapaan kapasiteettinsa puitteissa.	Reservitoimittajat voivat päivittäin antaa tarjouksia reservikapasiteetistaan. Reservitoimittaja, jolla on vuosisopimus, voi osallistua tuntimarkkinoille vain, jos on toimittanut vuosisopimuksen mukaisen reservimäärän täysmääräisesti.
Kiinteä hinta on voimassa koko vuoden. Se määräytyy kalleimman vuosimarkkinalle hyväksytyt tarjouksen mukaan.	Maksettava korvaus määräytyy kullekin tunnille erikseen kalleimman käytetyn tarjouksen mukaan.

3.2.3 Automaattinen taajuuden hallintareservi (aFFR)

Automaattisen taajuuden palautusreservin tarkoitus on sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimelliseen taajuuteen ja taajuudensäätöalueen palauttaminen suunniteltuun arvoon. Nimensä mukaan aFFR on automaattinen palautusreservi, joka on keskitetty ja aktivoituu automaattisesti. Aktivointi perustuu pohjoismaisen synkronialueen taajuuspoikkeamaan ja tapahtuu Findgridin toimesta 10 sekunnin välein, Findgridin automaattisen tehonmuutossignaalin perusteella. Säädön minikoko markkinoilla on 1 MW ja aktivoitumisaika on 5 minuuttia. Findgrid hankkii palautusreserviä automaattisesti kotimaisilta tuntimarkkinoilta. Lisäksi suomeen hankitaan taajuudenpalautusreserviä Ruotsin kantaverkkoyhtiöltä (Svenska kraftnät) sekä Virosta. Normaalisti hankintaa tehdään tunneille, joilla taajuuden muutokset ovat suurimpia ja hankinnoista mainitaan etukäteen. Findgrid tarjoaa myös reservintoimittajille mahdollisuuden tarjota erikseen tuntimarkkinoille Ylös- ja alas-säätökapasiteettia. Näiden säätöjen hinta määräytyy erillisen kapasiteettikorvauksen mukaan, joka määräytyy toteutuneiden säätöjen mukaan. Ylös-säädössä hinta määräytyy säätösähkömarkkinoiden ylös-säätöhinnan mukaan. Alas-säädössä hinta määräytyy säätömarkkinoiden alas-säätöhinnan mukaan.

Findgrid tiedottaa omilla sivuillaan, milloin Suomessa aFFR:lle on tarvetta. Automaattista taajuudenhallintareserviä hankitaan ennakkoon sovituille aamun, illan ja yön tunneille. aFFR:n kokonaiskapasiteetti pohjoismaissa on 300–400 MW.

Näiden tuotteiden lisäksi jokaisen pohjoismaan kantaverkkoyhtiön on pidettävä yllä nopeaa häiriöreserviä oman maansa mitoittavan vian verran.

Jokaisen pohjoismaan kantaverkkoyhtiö voi hankkia reserviosuutensa omalla parhaaksi katsomalla tavalla. Lisäksi, jotta reservivelvoitteet täyttyvät, Pohjoismaat voivat käydä keskenään kauppaa maiden välillä. Tärkeintä kuitenkin on, että jokaisella maalla on riittävästi kansallisesti hankittua reserviä, jotta mahdollisessa saarekekäytössä reservit riittävät. Pohjoismaat voivat hankkia normaalitilanteessa 1/3 taajuusohjatusta reservistä muista pohjoismaista. (Findgrid, 2021)

3.2.4 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat

Säätö- ja kapasiteettimarkkinoita pidetään yllä Fingridin toimesta. Reservintoimittajat saavat antaa säättökykyisestä kapasiteetistaan tarjouksia säättö sähkömarkkinoille ja Findgrid maksaa korvauksen, jos tarjoajan säättö sähkötarjous toteutuu. Säättö sähkömarkkinoita ylläpidetään yhdessä muiden kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Kantaverkkoyhtiöt tilaavat säättö sähkötarjouksia tarpeen mukaan. Tarve muodostuu mahdollisesta tilanteesta, jolloin säättö sähkömarkkinoiden avulla säilytetään verkon tasapaino ja käyttövarmuus normaalitilanteessa sekä häiriöissä. Fingrid varmistaa säättö sähkömarkkinoilla, että markkinoilla on käytössä aina riittävästi taajuuden palautusreserviä tuotannon ja kulutuksen välisen tehotasapainon ylläpitämiseksi. Lisäksi varmistetaan muut siirtoverkon käyttövarmuuden ylläpitämiseksi. Säättö sähkön kapasiteettimarkkinoilla reservintoimittaja sitoutuu jättämään tarjouskilpailussa hyväksytyjä kapasiteettitarjouksia vastaavan määrän säättö tarjouksia säättö sähkö markkinoille ja saa tästä kapasiteettikorvausta. Säättö sähkö- ja kapasiteettimarkkinoille osallistumisen edellytys on sopimus findgridin kanssa osallistumisesta säättö sähkömarkkinalle. (Fingrid, 2022a)

3.2.5 Säättötarjoukset

Edellytyksenä säättö tarjouksen jättämiselle on, että tarjoaja pystyy toteuttamaan minimi säättö tarjousresurssinsa 15 minuutin kuluessa sen toteutuessa (kuva 4). Säättö tarjouksen minikoko on 5 MW. Säättö tarjoukset pitää antaa 1MW tarkkuudella. Mikäli säättö tarjous toimii elektronisesti säättö reservin toimittaja voi tarjota yhden alle 5MW tarjouksen joka tunnille kutakin tuntia kohden. Tarjous voi olla joko ylös- tai alas-säättö. Tällöin tarjouksen minimikoko on 1 MW. Säättö tarjous pitää jättää Fingridille viimeistään 45 minuuttia ennen sen käyttötuntia. Esimerkiksi jos olet jättämässä tarjouksen klo 14.00 alkavalle tunnille niin se pitää lähettää Fingridin järjestelmään viimeistään 13.15, jolloin tuleva tunti sulkeutuu. Säättö tarjous pitää sisältää tarjouksen aika (h), teho (MW), hinta (€) sekä reservikohteen nimi, joka on ennakoltaan määritetty reservikauppa järjestelmässä.



Kuva 7 Mitä ylös ja alas säätötarjoukset tarkoittavat (Fingrid, 2022a)

Tarjotuista säätötarjouksista luodaan pohjoismaisilla säätösähkömarkkinoilla lista, jossa säätötarjoukset asetetaan hintajärjestykseen. Hintajärjestyksen avulla säätötarjoukset käytetään periaatteella ylös-säädössä halvin hinta ensin ja alas-säädössä kallein ensin. Mikäli tarjousta ei voida käyttää siirrytään seuraavaan tarjoukseen samalla periaatteella. Pohjoismaisilla säätösähkömarkkinoilla jokaiselle käyttötunnille määritetään sekä alas-, että ylös-säätö hinta. Ylös-säädön alin hinta on vähintään suomen sähkömarkkinoilla oleva hinta. Kun Fingrid on tehnyt tilauksen säätösähkötunnin tarjoaja saa maksun sovitusta energiasta ylös-säätö hinnan mukaan. Vastaavasti alas-säädössä tunnin hinta on korkeintaan vuorokausimarkkinan Suomen tarjousalueen hinta. Alas-säädössä, jonka Fingrid on tilannut tunnin aikana, Fingrid maksaa energiasta sovitun alas-säätöhinnan. Säätösähkön säätöhinnat toimivat myös tasesähkön hinnoittelun perusteena.

Säätökapasiteettimarkkinalla reservimyyjä saa kapasiteettikorvauksen marginaalihintaperiaatteella eli kalleimman hyväksytyyn tarjouksen mukaisesti. Korvauksen suuruus tarkistetaan hankintajakson jälkeen, ja siihen vaikuttaa säätökapasiteetin pysyvyys. (Fingrid, 2022a)

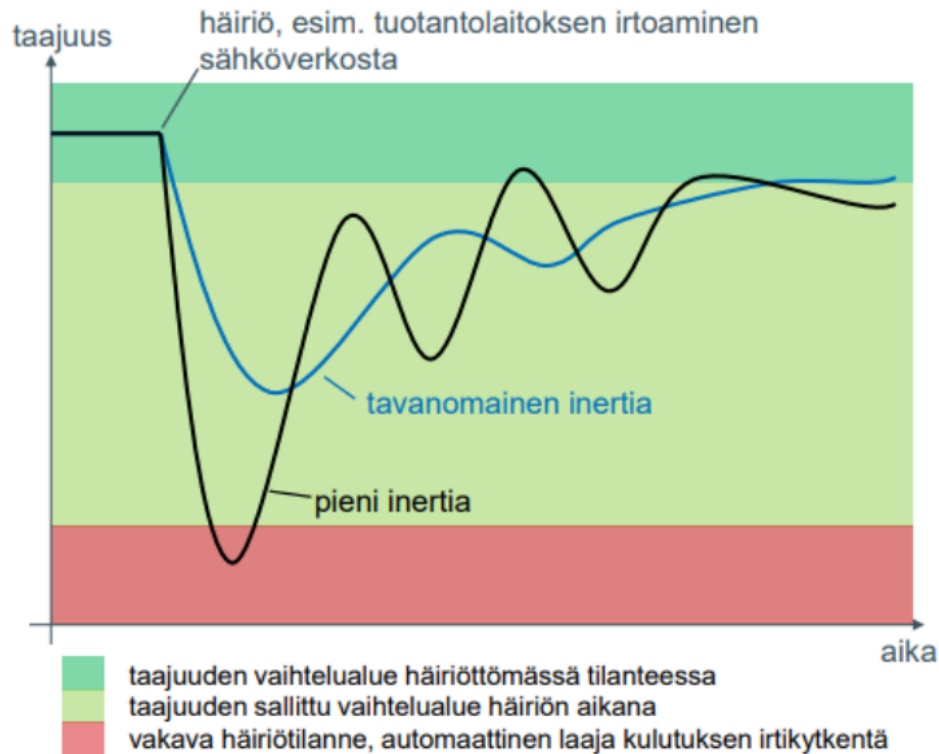
3.3 Mikä on inertia ja sen vaikutukset Suomen sähköverkkoon

Inertia on fysiikan termi, joka tarkoittaa muutoksen vastustamista ja hitautta. Sähköverkossa Inertiolla viitataan liike-energiaan, joka on sitoutunut voimalaitoksissa ja tehtaissa koneisiin. Koneet pyörivät sähköverkon taajuuden kanssa samalla taajuudella ja tämä aiheuttaa sähköverkolle inertiaa. Tämä on hyvä asia sähköverkon kannalta, sillä vaihtosähköverkossa taajuuden muutokset kuvaavat sitä, kuinka hyvin sähkön kulutus ja tuotanto ovat tasapainossa verkon jokaisena hetkenä. Jos tasapainossa sattuu muutos, inertia hidastaa muutosta. Eli mitä enemmän verkolla on pyöriviä

massoja sitä paremmin sähköverkko ottaa vastaa taajuuden heilahtelut ja tasaavat verkon taajuutta. Uudet sähköntuotantomuodot mukaan lukien tuuli- ja aurinkoenergia liittyvät verkkoon ilman pyörivää massaa, kun taas perinteisillä lauhdevoimalaitoksilla pyörivää massaa on. Tällöin inertia määrä sähköverkolla vähenee ja se aiheuttaa verkon tasapainon ylläpidolle haasteita. Tuulivoimalassa on pyörivä roottori mutta tämä ei näyttäydy samalla tavalla kuin perinteisessä voimalaitoksessa. Syynä tähän on tuulivoimalan ja sähköverkon välissä oleva taajuusmuuttaja, jonka takia pyörivän massan liike ei siirry automaattisesti sähköverkkoon taajuuden vaihdeltaessa. Vastaavasti ydinvoimalassa massan määrä on erittäin suuri ja se on suoraan yhteydessä sähköverkkoon ja näin ollen kasvattaa verkon inertiaa. Myös siirtoyhteydet huonontavat sähköverkon inertiaa koska sähkönsiirto tapahtuu tasasähköyhteyksien kautta.

Inertia pieneminen vaikuttaa äkillisissä sähköverkon muutostilanteissa negatiivisesti sillä taajuuden muutokset ovat suurempia ja nopeampia kun pyörivät massan määrä pienenee, tällöin myös verkon ”puskuri” vähenee (kuva 8). Tämä aiheuttaa sähköverkon taajuuden ylläpitämiseen kasvavia haasteita. Esimerkiksi käytännössä suuren tuotantoyksikön kuten olkiluodon ydinvoimalaitoksen irrotessa sähköverkosta, sähköverkon ylläpitäjä joutuu tekemään suurempia muutoksia, jotta sähköverkon tasapaino saadaan ylläpidettyä. Tämä voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että sähköön kuluttajia joudutaan kytkemään irti sähköverkosta laajalla alueella.

Pohjoismaisella sähköverkon alueella pyritään hankkimaan lisää nopeasti reagoivaa reservitehoa, joka aktivoidaan häiriötilanteessa, jotta voimme estää inertia vähenemisen vaikutukset sähköverkon toimintaan. (Fingrid,2018a)



Kuva 8 Inertian vaikutus häiriötilanteessa (Fingrid, 2018a)

3.3.1 Inertia pohjoismaissa

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla eniten inertiaa tuottavat alueet ovat Ruotsin (SE3) 23,4 % sekä Etelä suomi (FI-E) 20,2 %. Ydinvoimalat tuottavat eniten inertiaa, koska ydinvoimaloissa on suuria pyöriviä massoja. Myös vesivoimalassa on paljon pyörivää massaa mutta vähemmän kuin lauhdevoimaloissa tai ydinvoimalassa. Ruotsi sulkee tulevaisuudessa ydinvoimaloitaan, lisäksi pohjoismainen tuulivoima tuotanto lisääntyy mikä edesauttaa inertian vähenemistä pohjoismaissa. Myös siirtoyhteyksien lisääntyminen pienentää inertiaa, mutta vastaavasti teollisuuden kuormat siirtyvät taajuusmuuttajien perään, joka taas vähentää inertian tarvetta. Inertian pienemisen ratkaisuksi on erilaisia vaihtoehtoja.

- Pyörivän massan lisääminen

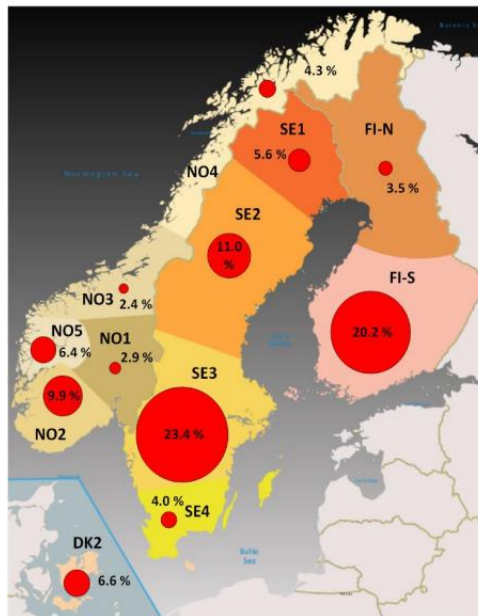
Verkkoyhtiö voi ostaa lisää sellaista tuotantoa, joka lisää inertiaa, isojen pyörivien moottoreiden lisääminen tai hankitaan lisää verkon tasapainotusta aina kun on pieni inertian tilanne, jolla ennakoidaan jo ennen mahdollista taajuushäiriötä.

- Nopean häiriöreservin lisääminen

Nopean uuden (FFR) häiriöreservikapasiteetin ostaminen pienen inertian tilanteissa. Reservien aktivoiminen ainoastaan taajuuden häiriö tilanteissa. Mahdollisuus, että HVDC-yhteydet, akut tai tuulivoima voivat tuottaa tällaista reserviä.

- Mitoittavan vian rajoittaminen

Ydinvoimalaitosten tuotannon rajoittaminen, jolloin kapasiteettia riittää myös inertian säätöön. HVDC-siirtoyhteyksien tehon rajoitukset tai vaihtoehtoisesti ennakoiva varautuminen jo ennen mahdollista taajuushäiriötä. (Fingrid, 2018a)



Kuva 9 Alueet, joissa inertian tuotanto on suurinta pohjoismaissa (Fingrid, 2018a)

4 Tuulivoima suomessa

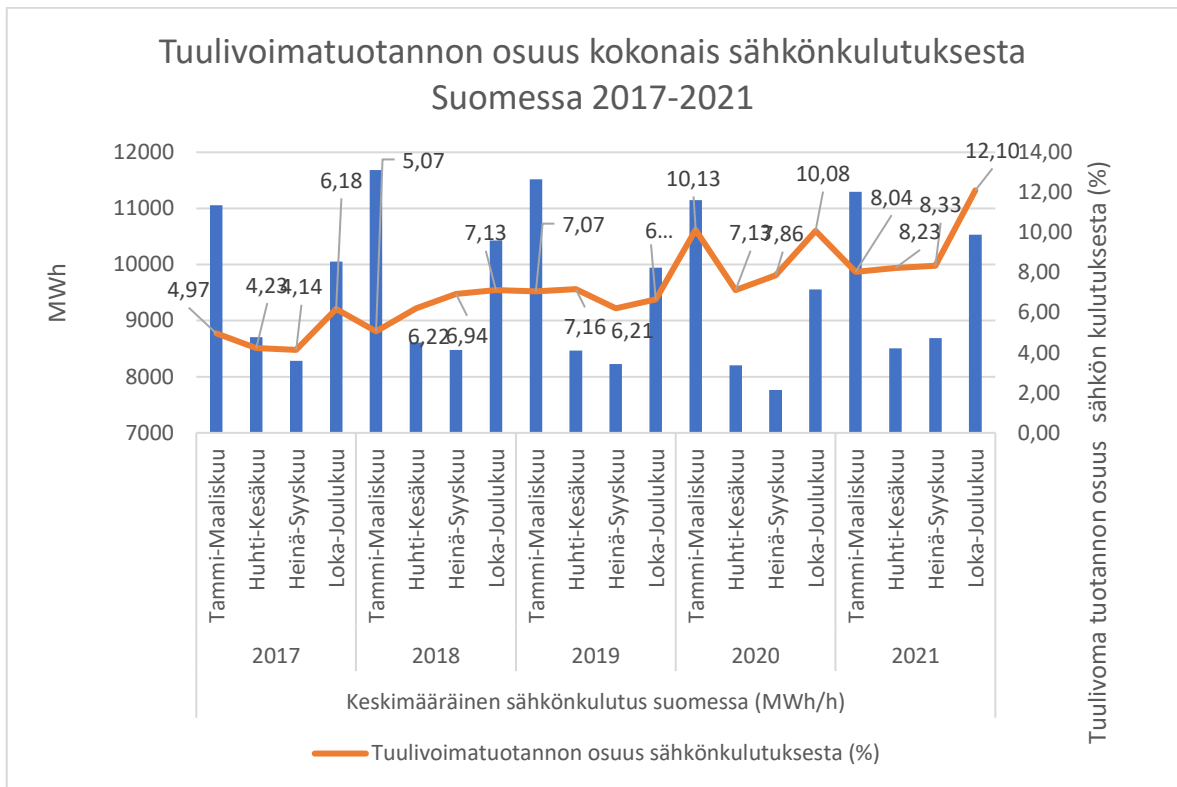
Suomessa tuulivoiman rakentaminen on alkanut selkeästi myöhemmin kuin muualla Euroopassa. Vuoteen 2008 loppuun asti suomessa oli käytössä valtion tuki tuulivoimahankkeille, jolla valtio avusti tuulivoimaninvestointeja 24–40 % investointikustannuksista.

Suomen tuulivoiman rakentamisen nousu alkoi vuosina 2012–2013 ja jonka jälkeen tuulivoiman määrä on lisääntynyt nousevaa vauhtia. Yhtenä auttava tekijänä tuulivoiman rakentamisen lisääntymiseen vaikutti Suomessa vuonna 2011 otettu tuotantotuki (syöttötariffi) järjestelmä. Syöttötariffi järjestelmän avulla tuotetulle tuulivoimasähkölle annettiin kolmena ensimmäisenä vuotena takuu hinta 105,5 €/MWh. Tavoite hinnan ollessa tuotannolle 83,5 €/MWh. Esimerkkinä jos suomessa sähkön hinta oli 30 €/MWh tuulivoiman tuottaja sai sen päälle valtion tuen, joka oli syöttötariffin ja sähkön hinnan erotus, tässä tapauksessa 75,5 €/MWh. Tuen taso ja määrä on laskettu, siten että tuuliturbiinien investointikustannuksista katetaan tällä tavalla noin 40 %. Syöttötariffi järjestelmä on sulkeutunut 1.11.2017 ja viimeiset hankkeet saavat tukea 12 vuoden ajan, jolloin tukijärjestelmään mukaan päässeet tuulivoima hankkeet saavat tukea vuoteen 2030 asti. (Suomen tuulivoimayhdistys)

Vuoden 2019 lopussa Suomessa on asennettua tuulivoimakapasiteettia 2284 MW. Tuulivoiman kapasiteetillä tuotettiin 5,9 TWh sähköä, joka vastaa Suomen sähkönkulutuksesta noin 7 prosenttia.

Suomen tuulivoimasta suurin osa on suomalaisessa omistuksessa (n.70 %) ja eniten tuulivoimaa on asennettu Pohjois-Pohjanmaalle (n.39 %). Tanskalainen Vestas on toimittanut (n.53 %) suomalaisista tuulivoimaloista. Suomeen asennetun tuulivoimankapasiteettiteho on kasvanut vuosittain. Kun vuonna 1991 kapasiteetin keskiteho oli 173 KW niin vuonna 2019 se oli jo 4,3 MW.

Suomen tuulivoiman potentiaali vuoteen 2030 on tuulivoimayhdistyksen mukaan 30 TWh kun tällä hetkellä tuulivoimatuotantoa on noin 6 TWh (vuonna 2019). Joten tuulivoiman markkinaehtoisessa rakentamisessa on suurta kasvupotentiaalia. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2022)



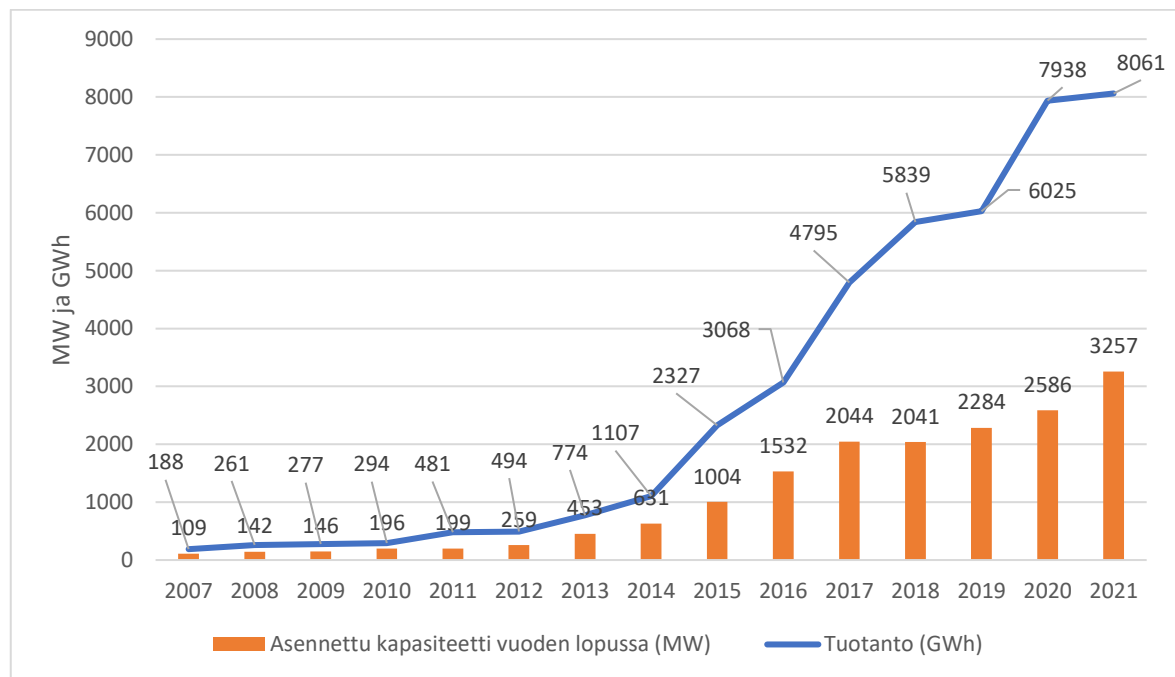
Kuva 10 Tuulivoiman tuotannon osuus sähkökulutuksesta (%)

Kuvasta 10 huomaamme, että tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on kasvanut hitaasti koko ajan kohti 10 % suhteessa suomen sähkökulutukseen. Talvikuukausina vuosina 2020–2021, tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus on ollut jo 10 % luokkaa, joka on merkittävä osuus suhteessa sähkön kokonaiskulutukseen. Tämän lisäksi sähkökulutuksen suurimmat keskimääräiset huippukuormat ovat kvartaaleittain tarkasteltaessa pienentyneet ja tuulivoimatuotannon määrät kasvaneet nostaten entisestään tuulivoiman tärkeyttä. Vuodet ovat olleet tarkastelujaksolla myös erilaisia sääolosuhteiden kannalta, mitkä myös vaikuttavat sähkökulutuksen huippukuormiin varsinkin talvella. Vuonna 2021 Loka-Joulukuussa tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus sähkön kokonaiskulutuksesta oli jo yli 12 % mikä on Suomessa tuulivoimalla tuotetun sähkön korkein osuus. Vastaavasti tuulivoiman osuus vuonna 2017 vastaavana ajankohtana oli vain reilut 6 %. Tuulivoima tuotannon kasvuvauhti on siis ollut nopeaa.

Toisena vertailuajankohtana on vuoden 2017 Heinäkuu-Syyskuu sekä Heinäkuu-Syyskuu 2021. Vuonna 2017 tuulivoiman osuus oli vain hieman reilut 4 % sähkön kokonaiskulutuksesta. Kun taas vuonna Heinä-syyskuussa 2021 osuus oli jo yli 8 %.

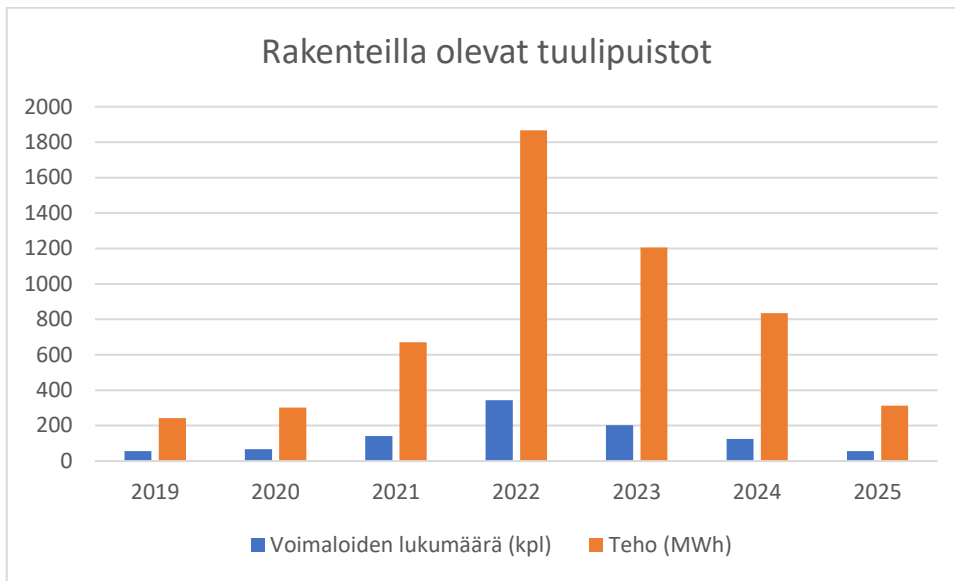
Tuulivoima siis vastaa hyvin suomen oloissa sähkönkulutuksen kysyntään. Tuulivoiman määrä kasvaa myös sähköntarpeen mukaan eli kun sähkönkulutus kasvaa talvella myös tuulivoiman tuotanto kasvaa.

Suomessa tuulivoimaloiden asennettu kapasiteetti on lähtenyt kasvuun vuonna 2010. Kuten aikaisemmin mainittiin tuulivoiman syöttötariffin käyttöönotto, oli suomen tuulivoiman osalta herätävä tekijä. Syöttötariffin ansiosta tuulivoiman määrä on lähtenyt selkeään nousuun ja asennetun kapasiteetin määrä on 27 kertaistunut vuosien 2010–2021 välillä. (kuva 11) Tuulivoiman kasvun kannalta vuodesta 2014 eteenpäin kasvu on ollut 500 MW vuodessa pois lukien vuosi 2017. Vuodesta 2019 kasvu vauhti on taas kiihtynyt ja rakenteilla olevan kapasiteetin mukaan tuulivoiman rakentamisen tiedossa oleva huippu on vuonna 2022 (kuva 12).



Kuva 11 Tuulivoiman asennettu ja tuotanto kapasiteetti (Energiateollisuus ry, 2022b)

Tuulivoiman merkitys suomen sähkötuotannossa kasvaa merkittävästi lähitulevaisuudessa. Tuulivoimatuotannon merkittävä merkkipaalu saavutettiin vuonna 2018 jolloin julkaistiin suomen ensimmäinen ilman valtion tukea rakennettava tuulivoimahanke. Nykyiset uudet tuulivoimalat ovat kaikki markkinaehtoisesti rakennettuja. Tätä trendiä on edesauttanut tuulivoimaloiden tehokkuuden parantuminen sekä tuulivoimaloiden rakentamisen kustannusten laskeminen tuotettua MW kohden.



Kuva 12 Suomeen valmistuvat tuulivoimalat 2019–2025 (Tuulivoimayhdistys, 2022a)

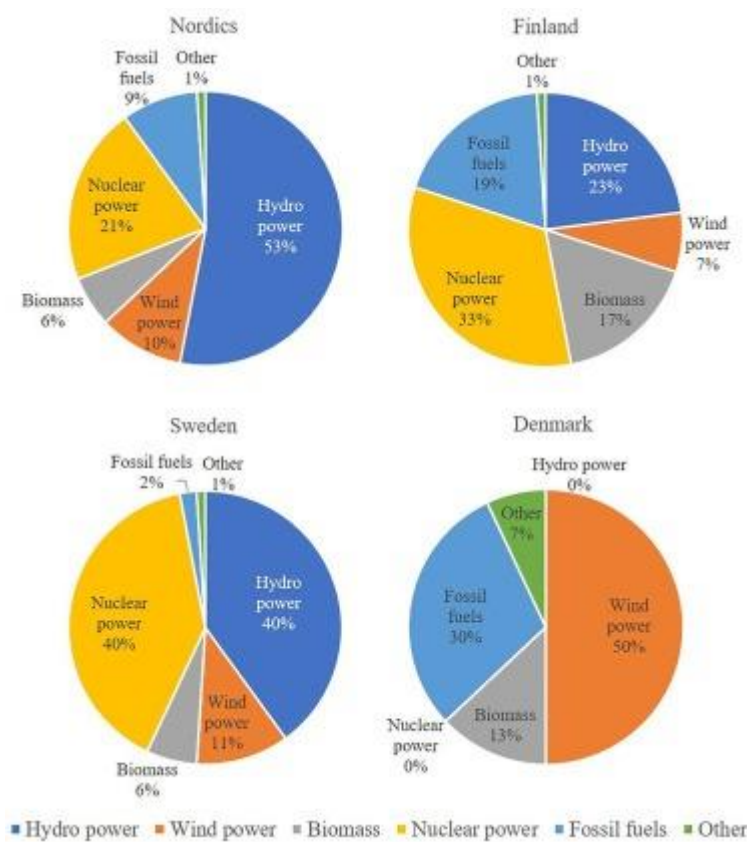
Kappaleessa 4.2 tutustutaan tarkemmin tuulivoimaloiden rakenteeseen sekä yleisesti tuulivoimalan toimintaan.

4.1 Suomen sähköntuotanto verrattuna Tanskaan ja Ruotsiin

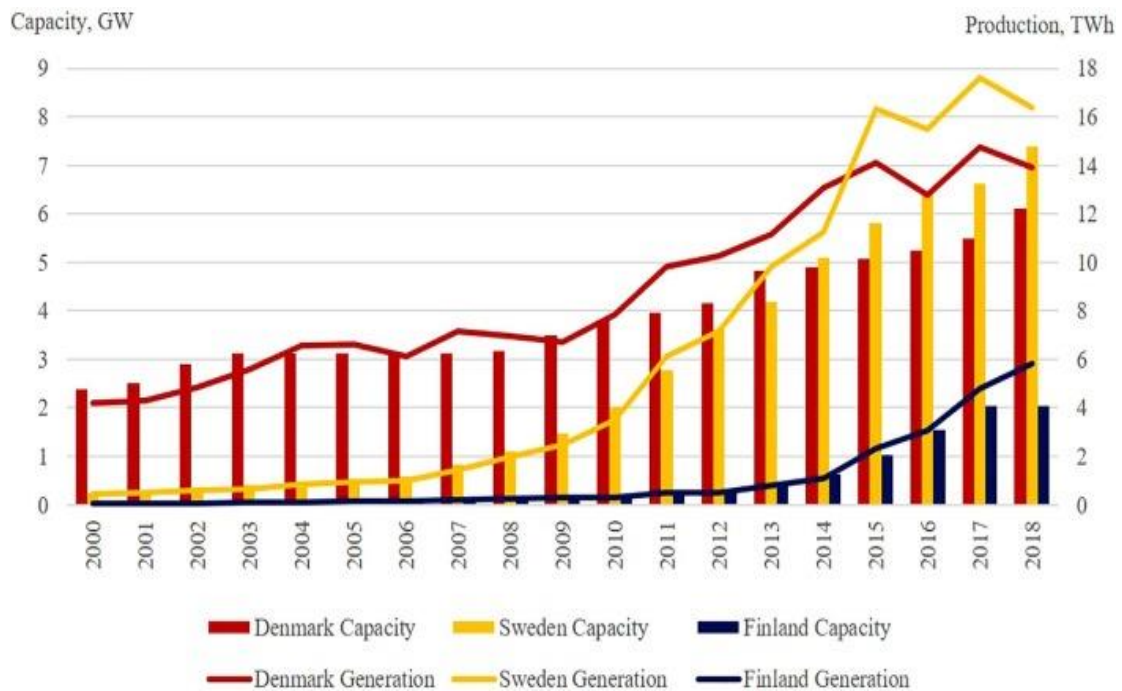
Pohjoismaista sähköntuotantoa ovat perinteisesti hallinneet vesi-, ydin- ja lämpövoimalat. Päämarkkinapaikka kaupankäynnille on ollut seuraavan päivän markkinat, koska niillä on riittävästi aikaa lähetettävälle tuotantoyksikölle nousta ja laskea. Tarjousalueiden ja muiden Euroopan sähkömarkkinoiden välistä kaupankäyntiä ohjaavat usein erot tuotantotyypeissä ja kapasiteetissa, vesiloissa ja siirtoverkossa. Erityisesti Tanska ja Suomi ovat riippuvaisia sähkön tuonnista, kun taas Ruotsi ja Norja ovat nettoviejiä. Sekä Ruotsissa että Suomessa on suuria ydin- ja vesivoimalla tuotettuja peruskuormia. Norjan sähköntuotanto tulee lähes kokonaan vesivoimasta, ja Tanskan sähköntuotantoa hallitsevat tuuli- ja lämpövoimalat.

Tarkempaan tarkasteluun olen ottanut kolme Pohjoismaata, eli Suomen, Tanskan ja Ruotsin. Näistä maista tekee mielenkiintoisen se että, Tanska on urauurtava ja hyvin tutkittu maa, joka pystyi integroimaan suuren osan tuulivoimasta perinteisesti lämpövoimaloiden hallitsemaan järjestelmään. Ruotsi on lisännyt asennettua tuulivoimakapasiteettiaan nopeasti ja hitaasta alusta huolimatta ohittaa Tanskan asennetussa kapasiteetissa. Ruotsi on myös purkamassa vanhoja ydinvoimalaitaan ja siten suunnittelee luopuvansa ydinvoimasta, mikä vaikuttaa tuotannon riittävyyteen. Suomi on suhtautunut maltillisemmin tuulivoiman käyttöön ja luottaa monipuoliseen tuotantoyhdistelmään.

Toisin kuin Ruotsissa, Suomi lisää ydinvoimakapasiteettia 1600 MW:lla lähes valmistuneella Olkiluoto-3:lla. Kaikki kolme maata noudattavat erilaisia lähestymistapoja energiajärjestelmien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen, ja tästä syystä näiden maiden erot selittävät eri sähkömarkkina- paikkojen käyttäytymistä ja merkitystä. Sähköntuotanto koko pohjoismaisella markkina-alueella (mukaan lukien Suomi, Ruotsi, Norja, Tanska ja Viro) ja tutkituissa Pohjoismaissa (Suomi, Ruotsi ja Tanska) vuonna 2017 on havainnollistettu kuvassa 13. Lisäksi kasvua tuulivoimakapasiteetista ja -tuotannosta vuosina 2000–2018 Tanskassa, Ruotsissa ja Suomessa on esitetty kuvassa 14. Suurin muutos tuotantojakaumassa on se, että lauhdevoimaa korvataan kasvavalla määrällä tuulivoimaa.



Kuva 13 Tuotantomuodot eri maissa: Pohjoismaat kokonaisuudessa, Ruotsi, Suomi ja Tanska. (Spodniak et al., 2021)



Kuva 14 Tuulivoiman kapasiteetti ja tuotanto (Spodniak et al., 2021)

Pohjoismaiden tarjousalueiden välillä on suuri ero tuulivoiman tuotannon määrässä. Vuonna 2017 Tanskan DK1 alueella sähköntuotannosta tuulivoiman osuus oli lähes 57 %. Vastaavasti Suomessa tuulivoimalla tuotettiin vain noin 6 % sähköstä tuulivoimalla (vuonna 2018). Kaiken kaikkiaan tuulivoiman osuus pohjoismaiden sisäisillä markkinoilla on erittäin suuri. (Spodniak et al. 2021) Ruotsin tuulivoimatuotannon kasvu on alkanut vajaa kymmenen vuotta aiemmin kuin suomen. Varsinkin vuosina 2009–2015 ruotsin tuulivoiman kapasiteetti määrät lähes tuplaantuivat vuosittain. Tanskassakin tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on lisääntynyt 2000-luvulla mutta huomattavasti vähemmän kuin vastaavasti Suomessa ja Ruotsissa, vaikka Tanskassakin tuulivoiman tuotanto on yli kaksinkertaistunut. Vuonna 2014 Ruotsin tuotanto ohitti Tanskan vastaavan määrän ja Ruotsin tuulivoimatuotanto on vuonna 2018 reilu 16 TWh kun vastaavasti Suomessa se on ollut n. 6 TWh.

4.2 Tuulivoimala

Tuulivoimalassa tuulen liike-energia muutetaan tuulivoimalan akselin pyörimisenergiaksi lapojen pyörimisen avulla. Tuulivoimalan akseli pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. Generaattorista tuotettu sähkö siirtyy muuntajan kautta sähköverkkoon. Tuulivoimala rakentuu roottorista, konehuoneesta, tornista ja perustuksista. Roottorissa sijaitsee tuulivoimalan lavat ja napa. (Kuva 13) Uusimmat tuulivoimalat ovat 3-lapaisia sekä vaaka-akselisia ja roottorin pyyhkäisy pinta-ala voi olla 2 hehtaaria. (Ely-keskus, 2020)

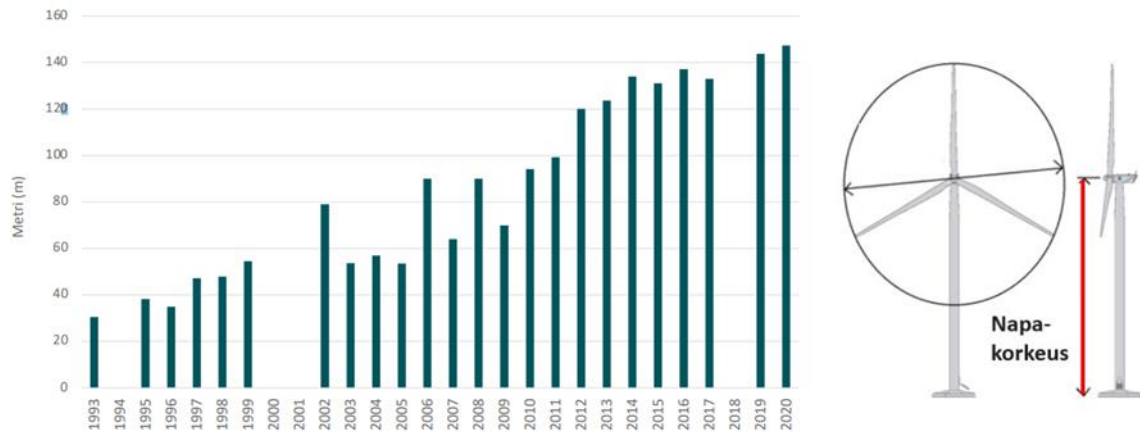
Tuulivoimalat vievät paljon maapinta-alaa koska ne pitää sijoittaa niin etäälle toisistaan, että lapojen aiheuttamat pyörteet eivät aiheuta muihin tuulivoimaloihin pyörteitä ja heikennä turbiinien tuotantoa. Mitä suurempi tuulivoimala, sitä kauemmas toisistaan ne on sijoitettava. Yksitöiset tuulivoimalat yhdistetään toisiinsa maakaapeleilla, jolloin tuulivoimaloita aletaan kutsua tuulipuistoksi. Tuulipuisto kokonaisuus yhdistetään sähköverkkoon kokonaisuutena. (Ely-keskus, 2020)

Tyypillisesti merelle rakennettavat tuulipuistot rakennetaan manneralustan alueelle, joka on noin 10 km:n päässä rannikosta ja noin 10 metrin syvyydessä. Merelle asennettavat tuulipuistot vaativat vankempaa tukirakennetta kuin maavoimalat. Haasteina ovat lisäksi sähkönsiirtoon tarvittavat merenalaiset kaapelit, sekä rakennus- ja huoltotöihin tarvittavat erikoisalukset ja -laitteet. Nämä tekijät aiheuttavat korkeampia kustannuksia, jonka takia tuulivoiman rakentaminen merelle on kaksi tai kolmekertaa kalliimpaa kuin maalle asennettavilla tuulivoimaloilla. Merelle asennettavat tuulipuistot eivät aiheuta niin paljon häiriöitä, kuten melu haittoja koska etäisyyden asutukseen ollessa aina suuri. Merituulivoimalan rakentamisessa voidaan hyödyntää myös merikuljetuksia. Vastaavasti maalla sijaitseva suuremmat tuulipuistot sijaitsevat lähes aina syrjäisimmillä seuduilla, jolloin joudutaan rakentamaan pidempiä sähkölinjoja kaupunkeihin. Merituulipuistot vaativat lyhyempiä siirtolinjoja koska ne voidaan sijoittaa lähemmäksi kaupunkeja, ilman suuria melu ja visuaalisia haittoja. Lisäksi merelle sijoitettavilla tuulivoimaloilla on paremmat kapasiteettikertoimet, voimakkaammat ja vakaammat tuuliolot, jolloin ne voivat hyödyntää pienempiä torneja mikä myös vähentää niiden visuaalisia haittoja. (Bilgili et al., 2011)

Tuulivoimaloiden koko ilmoitetaan nimellisteholla. Nimellisteho tarkoittaa sitä tehoa, millä se voi enimmillään tuottaa sähköä. Ihanteellinen tuulenvoimakkuus voimalalle, jolloin se saavuttaa nimellistehon on 10–15 m/s. Voimala voi tuottaa sähköä 3–25 m/s tuulen voimakkuudella mutta nimellistehoa ei tuulen joka voimakkuudella saavuteta, jonka takia tuulivoimala pääsee harvoin

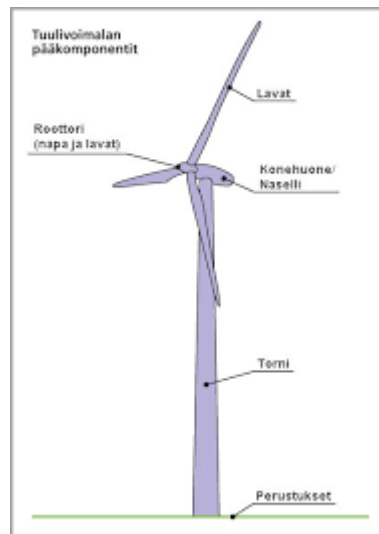
nimellistehoonsa. Nykyisien jo rakennettujen tuulivoimaloiden nimellisteho on 1–3 MW mutta markkinoilta löytyy nykyisin jo 8–10 MW tehoisia voimaloita. (Ely-keskus, 2020)

Asennettujen voimaloiden keskimääräinen napakorkeus (m)



Kuva 15 Asennettujen voimaloiden keskimääräinen napakorkeus (FCG, 2021)

Tuulivoimalan teho riippuu siitä, kuinka kova tuuli sijaitsee turbiinin roottorin tasolla. Peruseriaatteenä on se, että mitä korkeampi tuulivoimala on sitä paremmat tuuliolosuhteet; tuulee enemmän sekä tuuliolot ovat tasaisemmat. Tuulivoimaloiden aerodynamiikka on myös parantunut, jolloin tuulivoimaloiden hyötysuhdetta on pystytty parantamaan ja voimalan energiantuotantoa lisäämään. Voimaloiden käyttöikä on 20–30 vuotta edellytyksenä, että tarpeelliset huollot on tehty. Tämän jälkeen voimalat puretaan ja käyttökuntoiset osat kierrätetään uusiin voimaloihin. (Ely-keskus, 2020)



Kuva 16 Tuulivoimalan osat (Motiva, 2022)

4.2.1 (LCOE) Tasoitettu energian kustannus

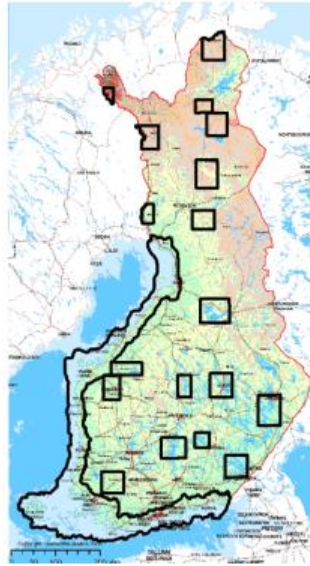
Vuonna 2018 (LCOE) Tasoitettu energiakustannus mittari, joka kuvaa generaattorin sähköntuotannon keskimääräisiä nykyhetken nettokustannuksia sen elinkaaren aikana oli saksassa alhaisempi kuin perinteisten fossiilisten polttoaineiden avulla tuotettu sähkö. LCOE:tä käytetään laajasti uusiutuvan energian tehokkuuden mittaamiseen sekä poliittisten päätösten tekemiseen. Analyysi osoittaa, että materiaalien (kupari, lasikuitu ja rauta), työvoima (työntekijöiden tuottavuus), laki- ja rahoituskulut vaikuttivat yli 30 % tuuliturbiinien hintojen kustannussäästöihin vuosina 2005–2017. Lisäksi käyttöönottoon perustuva oppiminen oli tärkein innovaatioajuri, sillä se vastasi puolesta kustannussäästöistä. Lisäksi selkeä poliittinen tuki on myös erittäin tärkeää tuulivoiman investointeihin liittyvä kannustin, joka pitää sisällään vakaat tukijärjestelmät, sekä selkeät sääntely- ja investointiympäristöt. Suoralla poliittisella tuella tutkimukselle ja kehitykselle ei ole enää nykyisin yhtä selkeää roolia investointien kannattavuudelle. (Elia et al., 2020)

4.3 Tuulen ennustettavuus Suomessa

Tuulivoimalat sijaitsevat pääsääntöisesti ilmakehän alimmassa kerroksessa. Ilmakehän alin kerros ulottuu 250 m korkeuteen ja sitä kutsutaan rajakerrokseksi. Rajakerroksessa tuuli käyttäytyy eri lailla kuin ylemmissä kerroksissa ja siihen vaikuttavat erilaiset maastolliset esteet, kuten puut ja mäet. Tuulen käyttäytyminen on tiedettävä tarkkaan, jotta pystytään arvioimaan tuulienergian potentiaali rajakerroksessa. Sääasemien viralliset tuulimittarit sijaitsevat 10 m korkeudessa maan pinnasta tai 10 metriä puiden latvuston yläpuolella ja tuuliturbiinien napakorkeudet ovat 140–175 metriä. Tämän takia virallisten tuulimittauksien lukemat voivat olla täysin eri, mikä on vallitseva tuuliolosuhde roottorin napakorkeudella hankaloittaen paikkansa pitävien tuuliennusteiden luomista. Mitä tasaisempi ja esteettömämpi maasto sitä selkeämpää ennustaminen on. Esimerkiksi mäet ja vaarat ovat hyviä tuulivoimalan sijoituspaikkoja koska niihin ei maan pinnan rosaisuus pääse vaikuttamaan. Napakorkeudet ovat nousseet myös sen takia, että jos tuulivoimalan napakorkeus vaihtuu 100 m-150 metriin niin tuulen keskinopeus nousee esimerkiksi helmikuussa 15 %, joka tarkoittaa tuulivoimalan tuotannossa 40 % kasvua. (Tuuliatlas, 2010. Suomen Tuulivoimayhdistys, 2022a)

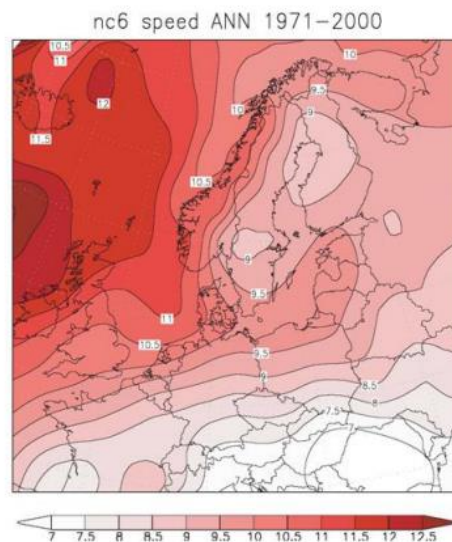
4.3.1 Tuuliatlas

Suomeen on perustettu ilmatieteenlaitoksen avulla suomen tuuliatlas (2009), joka on suomen tuulienergiakartasto, jota voidaan käyttää apuna arvioitaessa suomen eri alueiden tuulivoiman potentiaalia. Tuuliatlaksessa on esitetty tuuliolosuhteita eri korkeuksilta 50 metristä 400 metriin kuinka suuri on tuulen potentiaali. Tuulen potentiaalin arvioimiseksi tuuliatlaksessa tietyillä ennakkoon valituilla paremmilla tuulen alueilla kartasto on tarkempi, jolloin tuulivoimalan voi sijoittaa kartalle tarkemmin (rannikot, saaristot, tunturit ja jotkin sisämaa alueet). Tarkemmilla alueilla resoluutio on 250 m * 250 m ja muuten suomessa se on 2,5* 2,5 neliökilometriä. Tuuliatlas perustuu numeeriseen säämalliin, jossa on simuloitu 72 kuukauden aikana toteutuneet todelliset säätilanteet ulottuen vuodesta 1989 vuoteen 2007. Tulokset perustuvat tietokoneen tekemään mallinnukseen alueelta eikä sisällä yksittäisen pisteen tuulioloja. Mallinnus ja todellisuus eivät ole aivan absoluuttisesti samoja mutta antavat hyvää suuntaa organisaatiolle mahdollisista tuulivoiman investointiin liittyvästä potentiaalista. (Tuuliatlas, 2010)



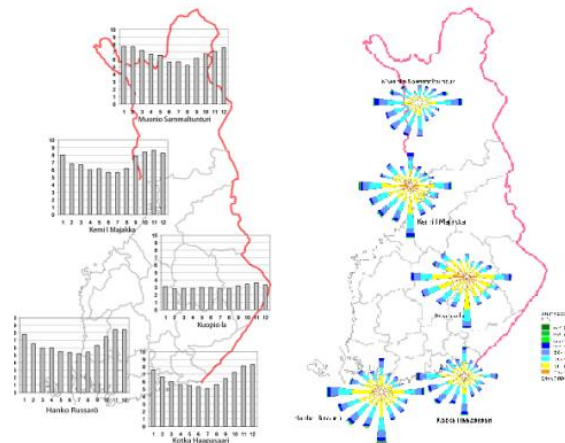
Kuva 17 tuuliatlakseen valitut tarkemmat alueet (Tuuliatlas, 2010)

Suomessa tuuleen ja tuulioloihin vaikuttavat maantieteellinen sijaintimme sekä Atlantilta saapuvat matalapaineet sekä niiden kulkemat reitit. Tuulivoimaloiden napakorkeudella tuulee eniten talvella ja vähiten kesällä, joka on taas suomen sääolosuhteiden kannalta paras sähkönkulutuksen ollessa talvella suurempaa. Suomen sijainnin takia tuuliolot kilometrin korkeudessa ovat paremmat kuin esimerkiksi keski-Euroopassa. Suomessa keskimääräinen tuulen nopeus näillä korkeuksilla on 9–9,5 m/s ja eteläisemmässä Euroopassa 7–8,5 m/s. (Tuuliatlas, 2010)



Kuva 18 Keskimääräinen tuulennopeus 1–1,5 kilometrin korkeudessa Euroopassa. (Tuuliatlas, 2010)

Suomessa tuulivoiman rakentaminen tuulten kannalta on kannattavinta merialueille, rannikolle ja tuntureille. Näillä alueilla on Suomessa huomattavasti tuulisinta, jolloin tuulivoimalasta saatava sähköteho on korkeimmillaan. Sääntönä voisi sanoa, että mitä avoimempi ja selkeämpi paikka sitä parempi se on tuulivoimalalle. Alapuolella on esitetty kuva suomen keskimääräisestä tuulen nopeudesta ympäri suomen eri alueilta. Kuten kuvasta huomaamme, sisämaahan asennettu voimala häviää tuulen määrässä huomattavasti muille alueille.

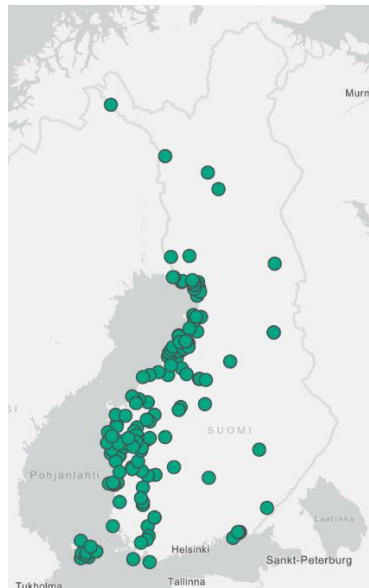


Kuva 19 Keskimääräiset tuulennopeudet eripuolelta suomea (Tuuliatlas, 2010)

Suomen länsirannikon saaristo on tuulioloiltaan huomattavasti haastavampi kuin esimerkiksi Saksan rannikko koska Suomen länsirannikko on huomattavasti rosoisempi kuin selkeä piirteinen Saksan rannikko. Siksi myös erilaisten tuuliennusteiden tekeminen on huomattavasti haastavampaa. (Tuuliatlas, 2010, Motiva, 2022)

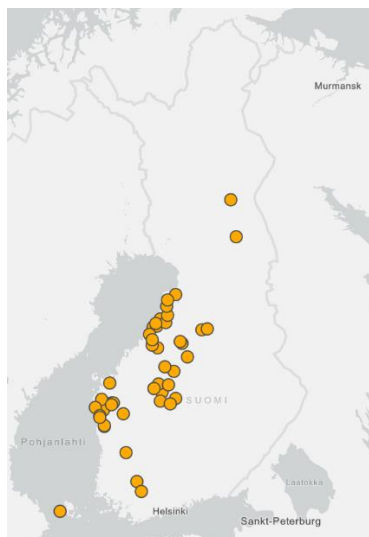
4.4 Tuulivoimaloiden sijainti Suomessa

Tällä hetkellä suurin osa Suomeen rakennetusta tuulivoimasta sijaitsee Suomen länsirannikolla tai pohjanmaalla (kuva 20). Tämä johtuu siitä, että Itä-Suomeen rakennettavat tuulivoimalat voivat aiheuttaa Suomen Puolustusvoimille haasteita maanpuolustuksellisesti tärkeisiin laitteisiin, jonka takia suuria tulipuistoja Itä-Suomessa ei juurikaan ole. (SLL) Suomen tämän hetken suurin tulipuisto sijaitsee Kristiinankaupungissa (34 tuulivoimalaa). Vastaavasti kumulatiivisesti suomen suurin tuulivoima paikkakunta on Kalajoki, jossa sijaitsee 64 tuulivoimalaa.



Kuva 20 Suomen tuulivoimalat (Tuulivoimayhdistys, 2022a)

Tällä hetkellä rakenteilla olevista tuulipuistoista suurin osa sijaitsee myös edellä mainituilla alueilla (kuva 21). Rakenteilla olevista tuulipuistoista suurin on tulossa Keski-pohjanmaan Lestijärvelle (69 tuulivoimalaa). Suhteutettuna Lestijärven asukkaiden määrään tämä tarkoittaa 1 tuulivoimala per 10 asukasta.



Kuva 21 Rakenteilla olevat tuulipuistot suomessa (Tuulivoimayhdistys, 2022a)

Vuosi 2022 on tuulivoiman rakentamisen huippuvuosi, sillä vuonna 2022 suomeen valmistuu 344 tuulivoimalaa ja niiden tuotantokapasiteetti on lähes 1900 MWh. Teoreettisesti kapasiteettiä

rakentuu siis enemmän kuin olkiluodon uuden 3 reaktorin kapasiteetti on. Joten voitaisiin sanoa, että vuosi 2022 on tuulivoiman vuosi.

Suomen tuulivoiman määrän ennustetaan kasvavan vuoteen 2025 loppuun mennessä 10 000 MW ja sähkönkulutuksen lisääntyessä myös tuulivoiman kapasiteetin odotetaan kasvavan ja tämän seurauksena suomessa ennustetaan olevan tuulivoima kapasiteettia vuoden 2030 loppuun mennessä yli 20 000 MW tuulivoimatuotantoa. (Tuulivoimayhdistys, 2022c)

5 Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden varautuminen tuulivoiman li- sääntymiseen

Pohjoismaiset sähkömarkkinat tunnetaan yhtenä ensimmäisistä onnistuneesti vapautetuista sähkömarkkinoista, joka ei ole kokenut toimitushäiriöitä. Pohjoismaiset sähkömarkkinat ovat varsin riippuvaisia vesivoimasta, sillä ne tuottavat 50 % koko sähköntuotannosta pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla (Amundsen & Bergman, 2006). Säästä riippuvan sähköntuotannon lisääntyminen viime vuosina on herättänyt suurta kiinnostusta sähkön varastointiin pohjoismaissa (Zakeri & Syri, 2015). Pohjoismaiset sähkön varastointiratkaisut perustuvat tällä hetkellä lähinnä pumppuvesivarastoihin (PHS). Pohjoismaissa on kuitenkin käytössä laajoja vesivarastoja järvissä, jotka tarjoavat sähkön tuotantoon joustavuutta. Norjalla on tällä hetkellä asennettuna 1,44 GW ja ruotsilla 0,1 GW PHS:ää. Pohjoismaissa on olemassa muutamia yksittäisiä kaupallisia akkuhankkeita, mutta niitä lähinnä käytetään taajuuden säätöön. Pohjoismaiden suurin akkuprojekti on rakenteilla Ylikkälään ja sen kapasiteetti on 30 MW/ 30MWh. (Koivunen et al., 2021)

Lisääntyvän uusiutuvan energian takia likviditeetin, volyymin ja tehokkuuden kannalta sähkön markkinat ovat siirtyneet entistä enemmän lähemmäs kaupankäynti hetkeä. Tuulivoiman lisääntyessä kuitenkin sähkömarkkinoilla on havaittavissa entistä suurempia poikkeamia ennustetun ja toteutuneen sähköntoimituksen ja ennusteen välillä. Siksi sähkökauppa siirtyy entistä lähemmäksi toteutuvaa hetkeä. Tällä tavalla voidaan välttää suuret säätösähkö poikkeamat markkinoilla, ja joka tekee markkinoista enemmän ennustettavat. Sähkömarkkinoilla toimimiseen liittyy suuria riskejä ja näistä suurimmat ovat hinta- ja volyyimiriskit. Hintariskin aiheuttaa epävarmuudesta osto- tai myyntihinnasta, joka tapahtuu tulevaisuudessa. Volyyimiriski taas on tuotetun ja ennustetun sähkönmäärän vaihtelusta aiheutuvaa, jota lisää uusiutuvan sähkön ennustettavuuden haasteet. Mitä enemmän on uusiutuvaa, joka on riippuvainen säästä, sitä suurempia on myynti ja osto volyymin riskit ja se lisää markkinoilla myös mahdollisia sähkön hinnan riskejä. Sähkömarkkinat ovat vastanneet tähän riskin pienentämiseen niin, että markkinat sulkeutuvat lähempänä toteutuvaa hetkeä, jolloin markkinoilla voi käydä kauppaa pidempään ja tällä tavalla yrittää välttää mahdollisia tuotannollista tai kulutus poikkeamaa omassa taseessa. Säästösähkömarkkinoilla ja erityisesti taseselvitys mekanismeilla pystytään palkitsemaan sellaiset tasevastaavat yhtiöt, jotka pystyvät joustamaan

säätösähkömarkkinoilla sähkönkulutuksen tai tuotannon osalta lähellä toimitushetkeä. (Spodniak et al., 2021)

On huomattu, että uusituvat energian lähteet ovat lisänneet säätösähkön tarvetta markkinoilla. Tulevaisuudessa tasevastaavien reagointi sähkön tasepoikkeamiin johtaa investointeihin, jolla voidaan vastata paremmin tasesähkön poikkeaman pienentämiseen. (Spodniak et al., 2021)

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla on Euroopan kunnianhimoisimmat hiilidioksidin vähentämistävoitteet. Tämä lisää myös isoja muutoksia sähköjärjestelmään. Perinteisesti pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla vesivoimalla on iso rooli joustavuudessa. Haasteita näihin markkinoihin tuovat jaksottaisen tuotannon kasvu, vähemmän joustava lämmöntuotanto sekä mahdolliset kasvavat saateet. (Spodniak et al., 2021)

Vuonna 2017 Tanska tuotti sähköstään 40 prosenttia, Ruotsi 12 prosenttia ja Suomi 5 prosenttia tuulivoiman avulla. (Spodniak et al., 2021)

Pohjoismaiset sähkömarkkinat on jaettu useampaan erilliseen tarjousalueeseen (katso kappale 3). Näillä alueilla tuulivoiman määrä vaihtelee suuresti sen mukaan, kuinka paljon on kyseiselle alueelle voitu asentaa tuulivoimakapasiteettia. Tämä taas muuttaa markkina-alueen käytöstä suhteessa hintaan ja alueen säädettävyyteen. (Spodniak et al., 2021)

Pohjoismaisilla markkinoilla, jossa tuulen osuus on suurempi kuin muilla, sähkön hintaerot johtuvat kausallisesti tuulen ennustevirheistä. Alueet, joilla tuulivoiman osuus on siis suurempi, on huomattavasti hankalampaa ennustaa seuraavan päivän tuotannon määrää. Tämä johtuu taas tuulivoiman sääriippuvuudesta, jota on vaikea ennustaa absoluuttisesti aina oikein. On huomattu, että vuonna 2017 tuulivoiman verrattuna paljon tuulta olevalla tanskan alueella (Tanskan tarjousalue 1, Tanskan tarjousalue 2) Suomen alueeseen hintariskiksi muodostui day-aheadin ja intraday kaupan välille 5–9 prosenttia keskimääräiseksi hintariskiksi. Hintariski on suurempi, mitä lyhyempi on tarkastelujakso. Hintariski tarkoittaa sitä kuinka paljon alueen hinta on vaihdellut ennustetun day-aheadin ja samana päivänä tapahtuvan kaupan välillä. Vaikutukset säätösähkön ja intraday kaupan välillä ovat suuremmat, mutta hintariski muodostuu myös koko päivän markkinoille ja näin ollen vaikuttaa myös pidemmälle aikavälille. (Spodniak et al., 2021)

Kysyntäennustevirheessä ei alueellisesti ole huomattu eroja alueiden välillä. Ennustevirhe on samansuuruisen koko markkinalla. Säätösähkön ja intraday markkinan välinen hintariski on prosentuaalisesti suurempi kuin Day-aheadin ja intradayn välillä. Tämä korostaa säätösähkö markkinan tärkeyttä. Kysyntäennustevirheen korjaaminen on selkeästi yhteisalueellinen ja kaikesta päätellen kysynnänriskin vähentäminen on yleisesti helpompia korjata tarkentamalla tasevastaavien

ennustemallia (Spodniak et al., 2021). Tähän onkin vastattu käynnistämällä varttitasehanke, jonka ensimmäinen vaihe on määrä ottaa käyttöön toukokuussa 2023. Varttitase mallilla on tarkoitus vastata sään mukaan vaihtelevan tuotannon lisääntymiseen sekä perinteisen säätökykyisen tuotannon vähenemiseen. Varttitasemalli toimii samalla tavalla kuin nykyinen säätösähkö malli (katso kappale 2.2.5) mutta säätökaupan toteutumisaika lyhenee 15 minuuttiin. (Fingrid, 2022d)

Spodniak et al. (2021) tekemässä tutkimuksessa keskitytään fyysisiin sähkömarkkinoihin, jotka pitävät sisällään päivän sekä päivänsisäiset säätömarkkinat. Sähkön tukkumarkkinoiden tärkein tehtävä on sähköjärjestelmän tehokas ja vaikuttava tasapainottaminen lyhyellä (halvin taloudellinen toimitus) sekä pitkällä aikavälillä (investoinnit). Lyhyellä aikavälillä markkinatoimijat pyrkivät tasapainoiseen portfolioon ja tämän takia käyvät kauppaa ennen toimitusaikaa välttääkseen epätasapainon taseessa ja siitä aiheutuvat kustannukset. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla käydään ennakkoivaa tasapainotusfilosofiaa. Toimitustunnin aikana kantaverkkoyhtiöt pyrkivät ennakoimaan epätasapainotilanteet ja tämän takia hankkivat ja aktivoivat tarvittavat säätösähköreservit. Pohjoismaiset markkinat toimivat eri lailla kuin esimerkiksi Saksan. Saksassa toteutetaan reaktiivista tasapainotusfilosofiaa, joka tarkoittaa sitä, että jokainen markkinatoimija tasapainottaa omaa tasettaan lähellä reaaliaikaa ja siirtoverkkoyhtiöt automaattisilla ja nopeilla reserveilla on tärkeä rooli. Eli Suomessa kantaverkkoyhtiö hoitaa tasapainottamisen ja Saksassa siirtoverkkoyhtiöt. (Spodniak et al., 2021)

Pohjoismaisilla markkinoilla säätösähkömarkkinoilla on ollut tärkeämpi rooli kuin päivänsisäisillä markkinoilla. Markkinaosapuolet ovat pohjoismaissa pystyneet paremmin säätämään omaa tasetta kuntoon säätösähkömarkkinoilla lähempänä toiminta tuntia. Lisäksi pohjoismaisia markkinoita on auttanut suuresti iso vesivoiman määrä, joka on suojannut markkinoita suurilta säätösähkön poikkeamilta ja näinkin myös hinnan muutoksilta. Nämä asiat ovat olleet hidasteena päivänsisäisen markkinoiden toiminnalle koska vaara epätasapainotuskustannuksista on ollut suhteellisen pieni. (Spodniak et al., 2021)

Tuulivoimatuotanto hyötyy lyhyemmistä varttitaseen käyttöönotosta koska tuulivoiman vaihtelu tunnin sisällä on vaikeammin ennustettavaa ja varttitaseella halutaan vastata tehotasapainon helppompaan ylläpitoon.

Säätösähkömarkkinat toimivat hintahuutokaupan tavoin. Huutokauppaan osallistuvat kaikki pohjoismaiset siirtoverkonhaltijat. Siirtoverkkoyhtiöt jättävät tarjoukset yhteisen operatiivisen tietojärjestelmän (NOIS) kautta. Selvitysmenetelmä on marginaalihinnoiteltu, joka perustuu käyttötunnin

aikana aktivoituun kalleimpaan- tai halvimpaan säätötarjoukseen. Markkinaosapuolet voivat jättää tarjouksensa 45 minuuttia ennen toimitusaikaa paikalliselle kantaverkkoyhtiölle. (Spodniak et al., 2021)

5.1 Tuulivoiman vaikutuksiin markkinoilla liittyvät tutkimukset

Vilim & Botterud (2014) tutkivat seuraavan päivän parhaita tarjousstrategioita kahdella erilaisella tasapainotusmekanismilla. Heidän tutkimuksensa osoitti, että tuulivoimalla on merkittävä vaikutus seuraavan päivän hintoihin, epätasapainon hinnoitteluun ja säätelyvolyyymiin.

Toisessa tutkimuksessa Hesamzadeh et al. (2018) väittivät, että day ahead markkinoiden pienemmät hintaerot vähentävät mahdollisuutta hyödyntää markkinoiden hintaerojen erotusta. He tutkivat, että sähkömarkkina-alueilla, joilla on ns. pullonkauloja sähkö kannattaa myydä day ahead markkinoille ja ostavat sähköä halvemmalla reaaliaikaisilta markkinoilta takaisin.

Batalla-Bejerano ja Baute-Trojillo (2016) tutkivat vaihtelevan uusiutuvan energian (VRE) vaikutusta sähköä tasapainotusmarkkinoiden vaikutuksiin ja kustannuksiin. säätöpalvelukustannuksilla (ASC) Espanjassa. He laskivat ASC:n hintaerona niin sanotun sähköä loppuhinnan, seuraavan päivän hinnan, päivänsisäisen hinnan ja kapasiteettimaksujen välillä, joita he yrittivät mallintaa ekonometrisesti jaksottaisen tuotannon eri ominaisuuksilla. He havaitsivat, että vRES-epävarmuus ja vaihtelevuus vaikuttivat positiivisesti ja merkittävästi sopeutumiskustannuksiin ja korostivat ennustevirheiden merkitystä integraatiokustannuksia selitettäessä.

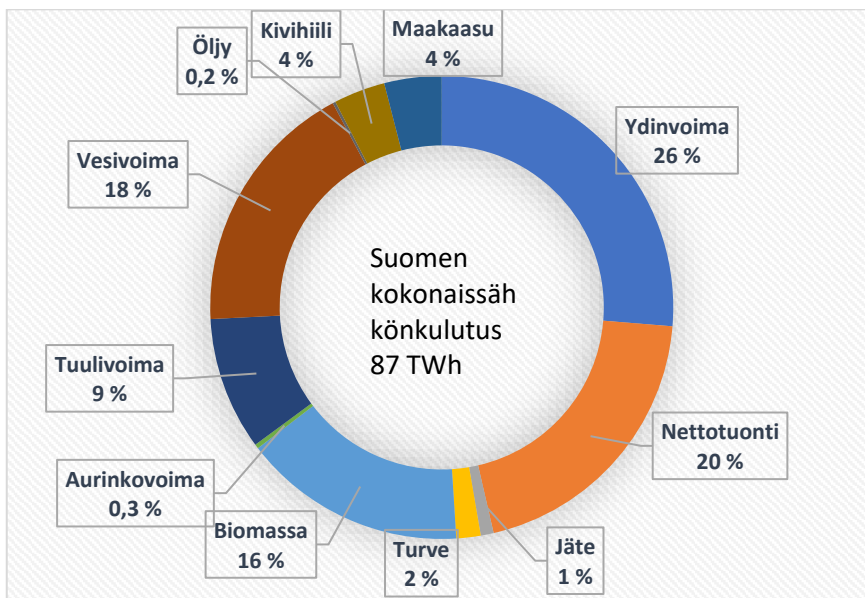
Tuulivoiman markkinoista on tehty lisäksi useampia muita tutkimuksia eri markkina-alueilla. Mutta selkeää johdonmukaisuutta on vaikea nähdä sillä säätösähkömarkkinat ovat erilaiset eri valtioissa, jolloin markkinoiden toimivuuden vertailu on vaikeaa. Siksi olen päättänyt keskittyä vain yhteen alueeseen myös sen takia, että Euroopan maiden sähköä tuotantomuodot ja kulutus ovat varsin erilaiset, jolloin on vaikeaa vertailla eri maita keskenään sekä tekemään niistä johtopäätöksiä verrattuna Suomen alueeseen. Suomen energiemarkkinat ovat isossa muutoksessa, johtuen tuulivoiman tuotannon suuresta lisääntymisestä sekä myös vuonna 2022 alkanut Venäjän hyökkäys ja siitä johtuva sota. Työssäni ei ole otettu huomioon tätä muuttunutta tilannetta, vaan tutkimus on rajattu vuoden 2021 loppuun.

5.2 Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden näkymät

Aikaisemmin taluskehitys on vaikuttanut suoraan myös energian ja sähkön kysyntään mutta nykyään näiden asioiden välillä oleva korrelaatio ei ole enää niin suora. Tämä suuntaus johtuu energiatehokkuuden paranemisesta sekä energian käytön säästämistä. Talous kehittyy vahvemmin palveluiden kasvaessa. Myös tietoisuus ilmastonmuutoksesta vähentää kysyntää vaikuttaen suoraan energian kysyntään. Liikenteen sähköistyminen nostaa huomattavasti sähkön kysyntää pohjoismaissa ja varsinkin Norja on maailman johtavia sähköautojen määrässä. Tulevaisuudessa pohjoismaat voivat olla sähköstä yliomavaraisia koska sähkön tuotannon kasvu on suurempaa kuin kysynnän lisääntyminen (Gasum, 2020). Ruotsin ydinvoiman sulkeminen vähentää yliomavaraisuutta ja vahvistuvat siirtoyhteydet Britanniaan ja Keski-Eurooppaan auttavat tehokkaampaan ylitarjonnan siirtoon. Pohjoismainen CHP-tuotanto on myös tulevaisuudessa laskemassa johtuen investointien vähydestä ja nykyisin tilalle tehdään entistä enemmän lämpökattiloita, joilla korvataan vanhaksi meneviä CHP-laitoksia. Uusiutuvan energian lisääntyessä sähkön tuotannon profiilierot kasvavat ja tätä suuntaa voidaan tasata kysyntäjoustolla sekä tulevaisuudessa akkuteknologialla. Varsinkin aurinkoenergiassa sähkön tuotannon kasvu on suurta, vaikka se ei vielä juurikaan näy sähkön kokonaistuotannossa. Uusiutuvan energian teknologian kehittyminen sekä uusiutuvan energian tuotannon lisääminen ja niiden kannattavuuden parantuminen vauhdittavat uusiutuvan energia lisääntymistä. (Gasum 2020)

6 Tuulivoiman lisääntymisen vaikutukset Suomen sätösähkömarkkinoihin

Suomessa tuotettiin sähköä vuonna 2021 69 TWh, joista uusiutuvalla energialla 54 prosenttia. Ydinvoima oli suomen eniten sähköä tuottava tuotantomuoto melkein 32,7 % tuotannolla. Seuraavaksi suurimmat olivat vesivoima 22,6 ja biomassa 18,3 %. Kotimaisessa sähkön tuotannossa hiilidioksidineutraalin tuotannon osuus sähköntuotannosta on jo 87 %. Suomessa kulutetun sähkönmäärä oli vuonna 2021 87 TWh, joten suomi on vielä vahvasti nettotuonnin varassa. Suomessa tuotetun sähkön hiilidioksidi päästöt ovat laskeneet vuoden 2010 227 g CO_2 /kWh verrattuna vuoden 2021 61 g CO_2 /kWh. EU-27 sähkön tuotetun hiilidioksidin keskiarvo vuonna 2020 oli 231 g CO_2 /kWh, joten olemme hyvällä tiellä suhteessa muuhun Eurooppaan. Suomen kokonaispäästöt ovat laskeneet tarkasteluvälillä lähes 70 %. Lisäksi vuonna 2022 Olkiluodon 3 reaktori tulee mukaan sähköntuotantoon ja se edelleen auttaa suomea sähkön hiilidioksidi päästöjen vähenemisessä. (Energiateollisuus ry, 2021)



Kuva 22 Suomen sähkön kulutus energialähteittäin vuonna 2021 (Energiateollisuus ry, 2022)

6.1 Suomen sähköjärjestelmä

Suomen sähköjärjestelmä on yksi maailman luotettavimmista, sillä se on rakennettu toimimaan luotettavasti, tehokkaasti sekä joustavasti mukautuen joka hetki vaihtuvaan kulutukseen. Lisäksi suomen laatuvaatimukset sähköverkolle ovat tiukat, jonka ansiosta luotettavuus säilyy korkealla tasolla. Sähköverkon on myös huolehdittava siitä, että suomessa voidaan joka hetki tuottaa tarvittava määrä sähköä myös silloin kun tapahtuu joku äkillinen häiriö joko sähköntuottajalla tai kuluttajalla. Suomessa sähköverkon järjestelmävastaavana toimii Fingrid, joka pitää huolen, että verkko toimii niin kuin se on suunniteltu. Fingridin vastuulle kuuluu myös huolehtia, että verkon siirtojärjestelmä pystyy kuljettamaan paikallisesti tuotetun isonkin määrän sähköä sinne missä sitä tarvitaan. Verkon toimivuuden kannalta tärkeää on, että voimajärjestelmässä on tarvittava määrä säätö- ja varavoimaa. Säätövoimalla voidaan reagoida tuotannon ja kulutuksen välisiin epätasapaino tilanteisiin ostamalla säätösähkö kauppaan osallistuvien laitosten sähköä, kun jokin muu laitos, joka on luvannut tuottaa ei pystykään siihen. Tai vastaavasti tarjoamaan säätöä alaspäin, jos jokin tuotantolaitos tuottaakin enemmän kuin on suunniteltu. (Fingrid, 2022f)

Suomessa on jo törmätty ongelmaan, jossa tuulivoiman lisääminen on haastanut jo sähkön kantaverkon siirtokykyä, jolloin tietyillä alueilla suomessa ei voida enää lisätä tuulivoiman määrää tekevä mittavia investointeja sähkön siirtoyhteyksiin. Suomen länsirannikolla, Porista Ouluun olevalla alueella on ennusteiden mukaan vuonna 2024 loppuun mennessä jo noin 5000 MW tuulivoiman tuotantoa. Kantaverkon siirtokyky tulee olemaan tällä alueella äärirajoilla häiriö- tai huoltotilanteissa. Tämän seurauksena Fingrid on käynnistänyt selvityksiä 400 kilovoltin yhteyksien vahvistamiseksi näille alueille. Uusien siirtolinjojen valmistuminen on vuosien 2027 ja 2028 aikana. Nämä hankkeet lisäävät sähkönsiirtokapasiteettia ja tuulivoiman mahdollisuuksia lisätä alueelle. Näiden siirtolinjojen valmistuminen on tärkeää, mutta voimalinjojen ympäristövaikutusten arviointi ja lupaprosessit vievät aikaa. Fingridillä on tällä hetkellä selvityksessä voiko kyseiselle alueelle enää lisätä tuulivoimakapasiteettia, tämän raportin tulos valmistuu syksyn 2022 aikana. (Fingrid, 2022c)

6.2 Säätövoima

Suomessa tärkeimpänä säätövoimana toimii vesivoima sekä naapurimailta tuotu siirtosähkö. Markkinat ovat kehittyneet ja nykyisin myös kuluttajat voivat osallistua säätösähkömarkkinoihin epäsuorasti käyttämällä sähköauton akkua lataamiseen, kun sähkönhintaa on matalalla tai vaihtoehtoisesti

sähkönhinta on korkealla omakotitalot voivat vähentää sähkönkulutusta, jolloin sähkö säästömarkkinoilla ei tarvitse hankkia niin paljon säästösähköä (Tuulivoimayhdistys, 2022). Tuulivoiman ei pitäisi olla vain passiivinen sähkön tuottaja vaan sillä voisi olla rooli ennakoivana tuottajana, joka vähentää sähköjärjestelmän epätasapainoa ja samalla sen tuottamaa sähkön määrää pitäisi pystyä vähentämään tilanteissa, joissa sähköjärjestelmässä on ylituotantoa. (Sorknaes et al., 2013)

Sihvonen (2020) on tutkinut tuulivoiman rajoittamista joko tuotantotehon tai huipputehon avulla. Vaihtoehtona tehon rajoitukselle on esimerkiksi lapaohjaus, eli mahdollisuus kääntää tuuliturbiinin lapoja. Sihvonen on tehnyt karkean teoreettisen tarkastelun tuotantokustannusten muuttumiseen. Tarkastelussa on oletettu, että investointi- ja huoltokustannukset ovat suhteessa tuotettuun energiaan. Tuuliturbiinilla tuotettu energia ja käyttöaika laskevat, kun tuotantoteho laskee, tämän takia tuotetusta energiasta on saatava korkeampi hinta, jotta kulut voidaan kattaa. Tuotantotehon laskua on vertailtu kolmella eri tuotantoteholla, alkuperäinen tilanne, 60 % ja 80 % rajoitus. Lopputuloksena karkealla teoreettisella tarkastelulla tulokseksi saatiin, että tuulituotannon avulla ainakin tuulisimpina hetkinä ylös- ja alas-säätöä voitaisiin tarjota pienillä kustannuksilla. Tarkastelu on teoreettinen, joten tehon rajoittaminen ei taloudellisesti olisi näin suoraviivainen.

Vaihteleva tuulivoiman tuotanto on lisännyt maissa, joissa on paljon tuulivoiman tuotantoa kuitenkin säästövoiman käyttöä määrällisesti eli tarvittava säästövoima on ollut aktiivisemmassa käytössä ja tämä on oletettavasti myös suomen suunta. Toivottavaa on myös, että kuluttajat osallistuisivat enemmän säästösähkömarkkinoihin ja sitä pitäisikin kannustaa. Säästövoiman määrään vaikuttaa myös olemassa olevan säästövoiman muutokset. Voimalaitosten sulkemiset voivat johtaa suomessa siihen, että suomeen pitää myös rakentaa lisää säästöön pystyviä laitoksia tai lisätä naapurimaihin liitettäviä siirtoyhteyksiä. Gasumin tekemän selvityksen mukaan suomeen voidaan rakentaa vuoteen 2030 mennessä 25–30 TWh lisää tuulivoimaa ilman säästövoimakapasiteetin lisäämistä. (Gasum, 2020)

6.3 Tuulivoiman vaikutukset säästösähkömarkkinoihin

Vuonna 2021 tuulivoiman osuus oli suomen sähkönkulutuksesta jo 9,3 % ja tulevaisuudessa sen määrä vain kasvaa. Aikaisempien tutkimuksien rajana, jolloin tuulivoiman tuotanto alkaa vaikuttamaan säästökauppaan on pidetty n. 10 % kokonaissähkön kulutuksesta.

Tutkimuksessa olen ottanut huomioon tuulivoiman toteutuneen määrän (MWh) sekä ennustetun määrän (MWh) vuoden jokaisena tuntina viiden viime vuoden ajalta (2017–2021). Tämän lisäksi huomioon otettu ennusteen ja toteutuman erotus prosentteina, eli kuinka paljon ennustetun tuulivoiman määrän ero on toteutuneeseen tuulivoiman tuotantoon (%). Lisäksi huomioon on otettu Nord Poolista Suomen aluehinta, systeemihinta, sekä toteutunut säätösähkön volyyymi joka tunnille sekä säätösähkön hinta. Edellä mainittujen muuttujien mukaan olen yrittänyt etsiä, onko tuulivoiman ennusteella, määrällä sekä ennusteella yhteys ylös- tai alas-säädön hintaan ja jos on niin voiko siitä saada joitakin johtopäätöksiä tuulivoiman vaikutuksesta. Tässä tutkimuksessa on huomioitu ainoastaan Suomen tuulivoiman vaikutusta. Tutkimuksen ulkopuolelle on jätetty kaikki muut sähkömarkkinoihin vaikuttavat asiat mukaan lukien Nord Pool Remit Urgent Market (UMM) ilmoitusten mukaiset häiriöt tuotannossa tai siirtoyhteyksissä. Tutkimuksessa on otettu huomioon vuoden jokainen tunti (8760 h), yksittäisenä tuntina. Tämä on paras tarkkuus, jonka Findgridin avoin data tarjoaa koska säätökauppaa tehdään vielä tunnin aikaisena kauppana. Säätökauppa voi loppua myös tunnin sisällä sekä hinta voi muuttua. Suomen säätösähkömarkkinoilla on myös tunteja, jolloin säätösähkökauppa on muuttunut ylös-säädöstä alas-säädöksi tai alas-säädöstä ylös-säädöksi.

Säätösähkömarkkinoilta saa korvausta tunnin loputtua määräytyvän säätötyypin mukaan, joka määrittyy säätömäärän mukaan, jos lopullinen säätömäärä poikkeaa nolasta. Tästä syystä säätösähkömarkkinoille osallistuvan tai kantaverkon ylläpitäjän tulisi pystyä ennustamaan seuraavalla tunnilla sähköverkossa tarvittavan säätösähkön määrää sekä säätösähkön suuntaa eli tyyppiä.

Säätösähköllä on suuri merkitys sähköverkon tasapainottavana tekijänä. Säätösähköllä pidetään kantaverkon tuotanto ja kulutus tasapainossa, ja tätä kutsutaan tehotasapainoksi. Jos sähköverkko ei ole tasapainossa sen taajuus alkaa vaihdella ja taajuuden liiallisesta poikkeamasta tavoitearvosta (50 Hz) voi seurata laaja-alainen sähkökatko. Tämän takia kantaverkkoyhtiöt pitävät yllä säätösähkömarkkinoita, joihin suuret sähkökuluttajat tai tuottajat voivat tarjota säätösähkötarjouksia. Säätösähkölle annetaan vuoden jokaiselle tunnille sekä ylös- että alas-säätöhinta. Jos kantaverkolla ei ole säätösähkön tarvetta, silloin sekä spot-hinta, että ylös- ja alas-säätö ovat saman arvoisia, jolloin sähkön hinta on sama kaikille edellä mainituille. Eli tasepoikkeama ei vaikuta sähköstä saatavaan hintaan.

Säätösähkötarjouksien avulla on mahdollista käydä markkinoilla säätökauppaa, jolloin sähkön tuottaja tai kuluttaja voi tarjota oman tuotannon tai kulutuksen säätökapasiteettia markkinoille. Eli jos on suunnitellusta tuotannosta varaa nostaa omaa tuotantoa tai vastaavasti vähentää kulutusta tai toisinpäin eli nostaa kulutusta tai vähentää tuotantoa voi markkinoille tarjota manuaalista säätösähköä. Säätösähkön hinta voi joissakin tapauksissa nousta tai laskea huomattavan paljon

erilaiseksi kuin markkinoiden edellisenä päivänä tarjottu spot-hinta. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että oman ennustetun sähkön kulutuksen tai tuotannon tasepoikkeama on vuorokauden jokaisella hetkellä mahdollisimman lähellä edellisenä päivänä tarjottua kulutusta ja tuotantoa. Alla olevassa kuvassa 23 selvitän asiaa, miksi oman sähkötaseen on tärkeä olla tasapainossa.

Alkuaika	Lopetus aika	Tuulivoiman tuotantoennuste (Fingrid) (MWh)	Tuulivoimatuotanto (Fingrid) (MWh)	Tilattu alassäätö			FI-Spot Hinta (Nordpool)
				Suomen säätösähkömarkkinoi Ita	Ylössäätöhinta säätösähkömarkkin oilla	Alassäätöhinta säätösähkömarkki noilla	
2021-12-20 18:00:00	2021-12-20 19:00:00	1712	2068	-626	460,08	23,15	460,08
2021-12-16 11:00:00	2021-12-16 12:00:00	2015	1944	-614,55	195,6	20	195,6
2021-12-20 17:00:00	2021-12-20 18:00:00	1723	2004	-607	439,97	26,93	439,97
2021-09-27 14:00:00	2021-09-27 15:00:00	181	183	-586	104,25	24	104,25
2021-12-20 16:00:00	2021-12-20 17:00:00	1736	1938	-567	428,82	29	428,82
2021-09-27 15:00:00	2021-09-27 16:00:00	165	190	-554	98,91	21	98,91
2021-12-20 22:00:00	2021-12-20 23:00:00	1662	2048	-552	308,85	24,5	308,85
2021-12-20 11:00:00	2021-12-20 12:00:00	1804	1729	-541	364,81	35	364,81
2021-12-20 19:00:00	2021-12-20 20:00:00	1681	2156	-538,34	308,9	20	308,9
2021-09-27 17:00:00	2021-09-27 18:00:00	318	293	-530	107,97	25	107,97

Kuva 23 Alas säätöhinnat säästösähkö markkinoilla

Kuvassa 23 on vuoden 2021 Suomen säätösähkömarkkinoiden suurimmat tilatut alas säädön MWh määrät, jolla sähköverkon tasapainoa on jouduttu säätämään eli nämä tunnit ovat toteutuneet alas säätömarkkinoilla. Vaikka spot-hinta on ollut korkealla, niin toteutunut alas-säätöhinta on ollut huomattavan alhaalla. Jos sähköntuottajalla tai kuluttajalla on ollut omassa sähkötaseessa poikkeamaa eli tässä tapauksessa liikaa tuotantoa niin he ovat saaneet taseen ylituotannosta vain alas säädön hinnan. 20.12.2021 klo 18.00–19.00 tuulivoiman tuotannon ylitys ennustetusta on ollut yli 300 MWh enemmän, kun on ennustettu. Tästä poikkeamasta ei ole saatu kuin vähän yli 23 €/MWh, vaikka markkinoiden spot-hinta on ollut yli 460 €/MWh.

Seuraavassa kuvassa 24 on kuvattu tilannetta missä sähkön kulutus on paljon korkeampaa kuin on ennustettu, jolloin säätösähkömarkkinoilla on tarvittu ylös-säätöä sähköverkon taajuuden korjaamiseksi.

		Tilattu ylössääto						
		Tuulivoiman	Suomen		Ylössäätohintaa	Alassäätohintaa		
Alkuaika	Lopetus aika	tuotantoennuste (Fingrid) (MWh)	Tuulivoimatuotanto (Fingrid) (MWh)	sääto sähkömarkkinoi Ita	sääto sähkömarkkin oilla	sääto sähkömarkki noilla	FI-Spot	Hinta
2021-11-26 15:00:00	2021-11-26 16:00:00	331	295	509,2	4899	169,75	169,75	
2021-11-26 16:00:00	2021-11-26 17:00:00	309	293	507,783	5000	184,52	184,52	
2021-12-30 23:00:00	2021-12-31 00:00:00	1192	1056	483,45	200	87,72	87,72	
2021-12-29 20:00:00	2021-12-29 21:00:00	654	441	471	376,54	163,63	163,63	
2021-03-12 10:00:00	2021-03-12 11:00:00	1588	1231	452,9	446,93	42,87	42,87	
2021-12-11 10:00:00	2021-12-11 11:00:00	852	441	451,92	490	179,71	179,71	
2021-11-26 17:00:00	2021-11-26 18:00:00	307	299	443	5000	217,06	217,06	
2021-12-31 00:00:00	2021-12-31 01:00:00	1116	977	441,38	200	52,23	52,23	
2021-10-06 22:00:00	2021-10-06 23:00:00	2253	2359	440	130	51,88	51,88	
2021-08-23 08:00:00	2021-08-23 09:00:00	1504	1448	438,5	321,81	73,96	73,96	

Kuva 24 Ylös sääto hinnat sääto sähkö markkinoilla

26.11.2021 klo 16.00–17.00 Suomessa ylös-sääto sähkön hinta on noussut maksimiin eli on jouduttu tilaamaan maksimihintaa asti (5000 €/MWh) kaikki markkinoilla oleva ylös-sääto sähkön kapasiteetti. Tuulivoiman puuttuvasta ennustetusta kapasiteetista on siis jouduttu maksamaan 5000 €/MWh, vaikka suomen spot-hinta on ollut alle 200 €/MWh. Suurimmat ylös-sääto tilaukset ovat olleet yli 400 MWh, joten pelkällä tuulivoiman tuotannon taseen korjauksella ei sääto sähkön hintaa olisi saatu korjattua.

		Tilattu alassääto		Tilattu ylössääto		Alassäätohi		
		Tuulivoiman	Suomen		Suomen	Ylössäätohintaa	nta	
Alkuaika	Lopetus aika	tuotantoennuste (Fingrid) (MWh)	Tuulivoimatuotanto (Fingrid) (MWh)	sääto sähkömarkkinoi Ita	sääto sähkömarkkin oilla	sääto sähkömarkki noilla	sääto sähkö markkinoilla	FI-Spot Hinta
2021-05-20 04:00:00	2021-05-20 05:00:00	1397	1536	-329,93	0	13,94	-100	13,94
2021-07-18 14:00:00	2021-07-18 15:00:00	1543	1806	-73,333	0	3,04	-30	3,04
2021-07-18 13:00:00	2021-07-18 14:00:00	1494	1771	-97	0	2,9	-24,07	2,9
2021-04-04 15:00:00	2021-04-04 16:00:00	1986	1956	-37,15	0	0,1	-15	0,1
2021-04-04 16:00:00	2021-04-04 17:00:00	1978	1960	-32,5	0	1,18	-15	1,18
2021-05-20 03:00:00	2021-05-20 04:00:00	1474	1489	-115	0	11,29	-11,5	11,29
2021-04-04 17:00:00	2021-04-04 18:00:00	1980	1903	-7,34	0	7,01	-10	7,01
2021-10-03 00:00:00	2021-10-03 01:00:00	1647	2108	-7,25	0	0,09	-9	0,09
2021-10-03 01:00:00	2021-10-03 02:00:00	1741	2094	-8,67	0	1	-8,07	1
2021-05-20 02:00:00	2021-05-20 03:00:00	1467	1447	-65,83	0	10,72	-7,8	10,72

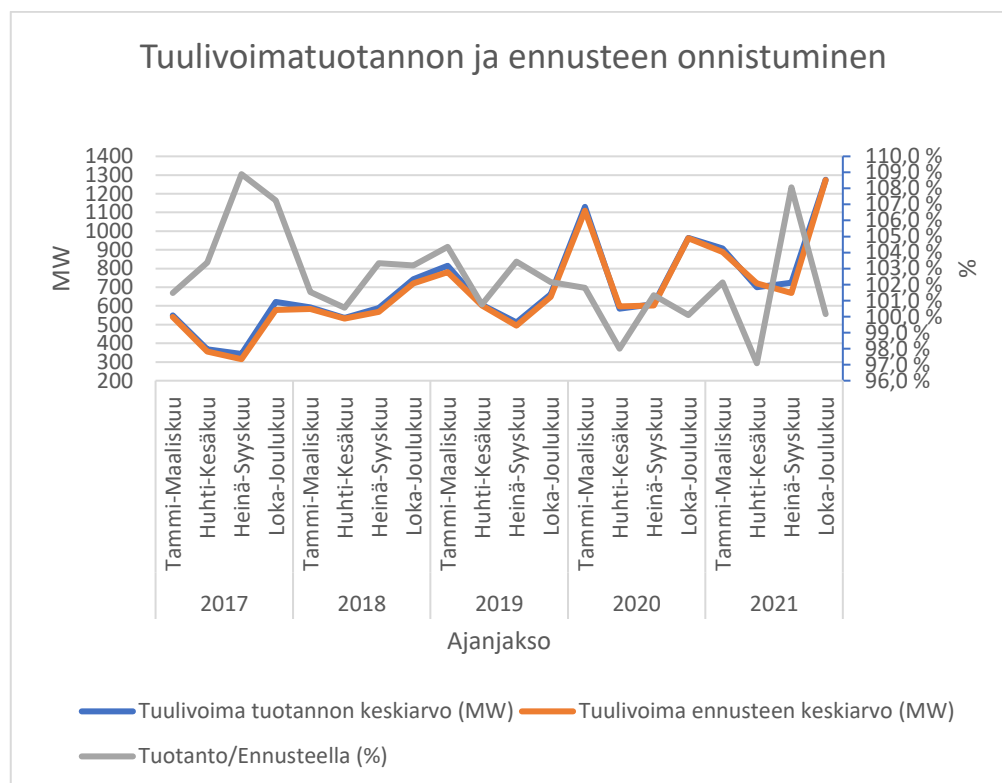
Kuva 25 Negatiiviset hinnat sääto sähkö markkinoilla

Kolmantena esimerkkinä on sääto sähkön negatiiviset hinnat. Kuvassa 25 on esimerkkinä vuoden 2021 matalimmista toteutuneista sääto sähkön hinnoista. Kuvassa 25 olevissa esimerkeissä sähkön tuottaja on joutunut maksamaan siitä, että he tuottavat enemmän sähköä kuin ovat spot-markkinoille edellisenä päivänä ovat myyneet. Toteutuneissa hinnoissa korostuu matala spot-hinta sekä

tuulivoima tuotannon suuri määrä. Tasesähkön ylitetystä poikkeamasta on joutunut suurimmillaan maksamaan yli 100 €/MWh 20.5.2021 klo 00.00–01.00. Eli ylituotanto tasesähkössä on ollut erittäin kallista. Sähkön kulutus vastaavasti erittäin halpaa sillä, jos olet kuluttanut kyseisellä tunnilla enemmän, kun on suunniteltu, siitä on maksettu aikaisemmin mainittu yli 100 €/MWh.

6.4 Tuulivoima tuotannon ennusteen onnistuminen

Tutkitaan aluksi, kuinka hyvin tarkastelujaksolla 2017–2021 tuulivoiman ennustaminen on onnistunut. Fingrid ennustaa suomen tuulivoiman määrän seuraavalle vuorokaudelle ja sitä päivitetään kerran vuorokaudessa aina klo 12, joten se tehdään ennen seuraavan vuorokauden day-ahead markkinoiden tuloksia. Ennuste annetaan aina 36 tunniksi ja päällekkäiset ennustukset aina yli kirjoitetaan. Ennusteen antaminen perustuu tuulten ennusteisiin sekä tietoihin tuulivoimaloiden sijainneista, niiden koosta sekä tuotantokapasiteetista. Lisäksi Fingrid käyttää ennustamiseen useita toimittajia. (Fingrid, 2022e)

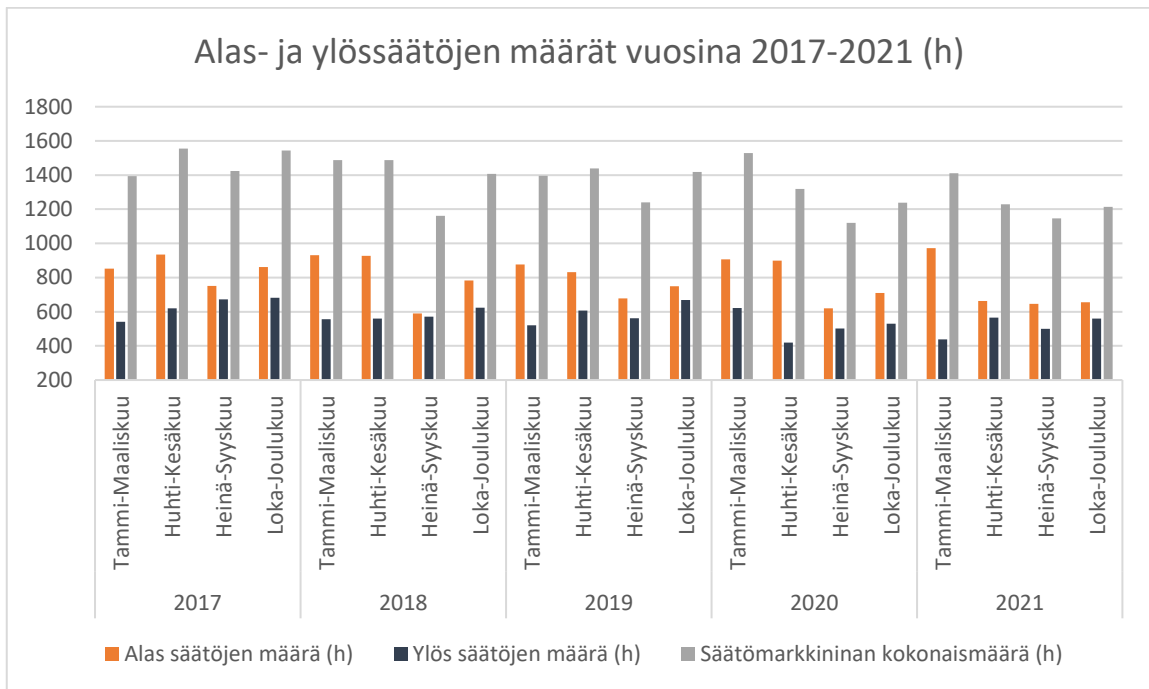


Kuva 26 Tuulivoima tuotannon ja ennusteen onnistuminen valitulla tarkastelujaksolla keskimääräisen tuotannon ja ennusteen mukaan.

Olen tarkastellut tuulivoimatuotannon ennusteen tarkkuutta keskimääräisen tuotetun tuulivoiman määrän ja ennusteen mukaan (Kuva 26). Tarkastelussa on huomioitu kvartaalin keskimääräiset sähkön tuotannot ja ennusteet sekä niiden välinen ero jaksolla. Tästä on saatu tuotannon ja ennusteen ero. Tuulivoiman toteutunut tuotanto on ollut tarkastelujaksolla lähes koko ajan suurempaa kuin ennustettu tuotanto. Poikkeuksen tekevät kevät kaudet huhtikuu-kesäkuu vuosina 2020 ja 2021. Suhteessa eniten on tuullut ennustettuun tuulen määrän vuosien 2017 ja 2021 heinä-syyskuussa, jolloin tuulivoiman tuotanto on ylittänyt ennustetun määrän yli 8 prosentilla. Kuvaajan mukaan ennuste malli kvartaali tarkastelulla on hyvin linjassaan tuotannon ja ennustetun välillä. Voisiko nämä poikkeamat näkyä säätökauppojen määrissä erityisesti kyseisinä ajankohtina.

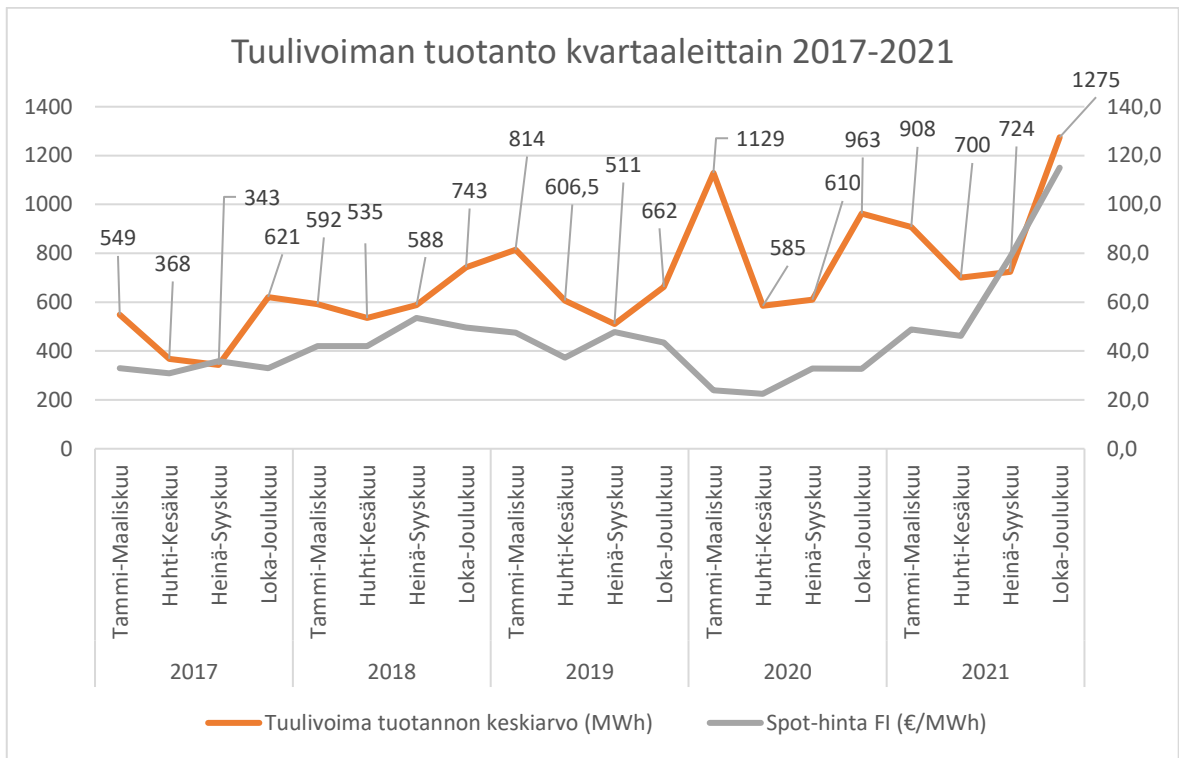
6.5 Mihin vuodenaikaan säätökauppaa käydään aktiivisimmillaan?

Säätökaupan aktiivisuus säätömarkkinoilla muuttuu vuodenajan mukaan. Vuosina 2020–2021 on säätökauppaa käyty kokonaismäärältään aktiivisimmillaan tammi-maaliskuussa. Vastaavasti heinäkuu-syyskuu on ollut viime vuosina säätökaupassa hiljaisinta aikaa säätökauppojen määrällä mitattuna. Eli tuotanto- ja kulutusennusteet ovat olleet parhaiten ennustettavissa, jolloin verkon tasa-painottamiseen vaadittavaa manuaalista säätökapasiteettia on tarvittu vähiten. Ylös-säädön osalta tammi-maaliskuu on rauhallisinta aikaa mutta vastaavasti varsinkin vuosina 2020–2021 on alas-säädön määrä ollut huomattavan korkea vastaavana ajankohtana, jonka takia säätökauppojen kokonaismäärässä vuosina 2020–2021 tammi-maaliskuu on ollut aktiivisinta aikaa vuodessa. Tästä voisi päätellä, että kun keskimääräinen tuulivoiman tuotanto määrä on pieni niin myös silloin säätösähkö markkinoilla on ollut säätökaupan osalta säädön määrät hieman pienempiä. Mutta kauppojen määrä ei ole mitenkään huomattavan paljon matalampi.



Kuva 27 Manuaalisen säätösähkön määrät kvartaalikohtaisesti (h)

Seuraavassa kuvassa 28 on tutkittu tuulivoiman kokonaistuotantoa kvartaaleittain viiden vuoden ajanjaksolla 2017–2021 sekä keskimääräistä spot-aluehintaa suomessa. Taulukosta huomataan, että tuulivoiman tuotanto on suurimmillaan loppusyksystä kevääseen ja kesällä tuulivoiman tuotantomäärät laskevat selkeästi. Mutta tuulivoiman määrä ei juurikaan vaikuta sähkön aluehintaan kvartaalitarkastelulla sillä, vaikkakin tuulivoiman tuotantomäärät kasvavat aluehinta ei seuraa sitä. Tästä voi päätellä, että suomen oloissa tuulivoiman tuotanto ei määrittele kvartaalitasolla sähkön aluehintaa. Selkein esimerkki on vuoden 2021 viimeinen kvartaali, jolloin tarkastelu ajanjaksolla on tuulivoiman tuotanto ollut suurimmillaan mutta sähkön aluehinta on noussut myös ajanjakson korkeimmaksi, vaikka tuulivoiman keskimääräinen tuotanto on lähes kaksinkertaistunut Heinä-Syyskuusta, Lokakuu-Joulukuulle. Tuulivoiman keskimääräiset tuotantomäärät puolittuvat kvartaali 2 ja kvartaali 3. Tämä johtuu siitä, että suomessa on paremmat tuuliolosuhteet talvella eli tuulen määrä kasvaa. Yhtenä tärkeänä tekijänä on, että talvella kylmä ilma on tiheämpää kuin kesän lämmin ilma, jonka takia tuulivoimala tuottaa enemmän energiaa.

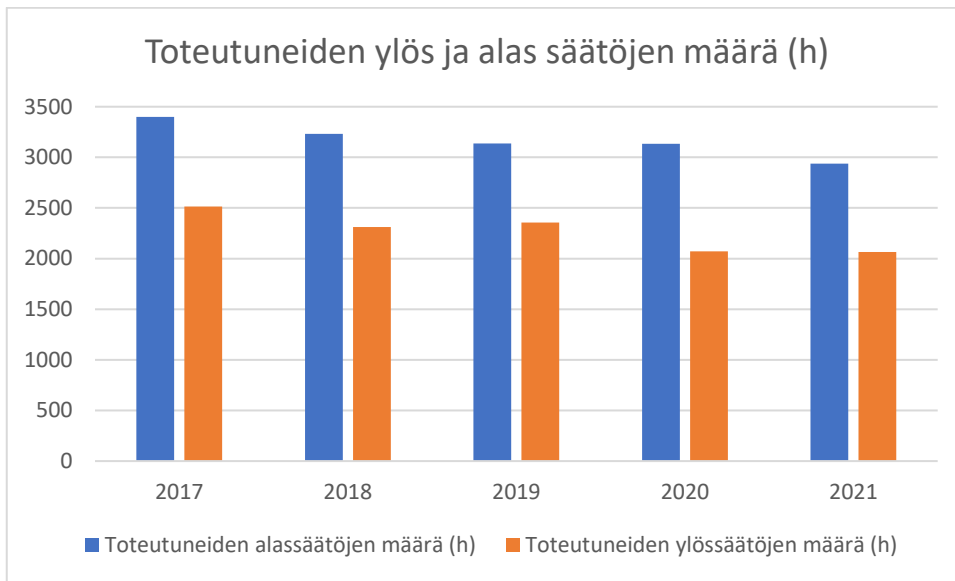


Kuva 28 Tuulivoiman tuotanto kvartaaleittain keskiarvo (MWh)

6.6 Toteutuneiden säätötarjouksien määrä

Seuraavaksi tarkastellaan säätösähkömarkkinoiden historiaa vuosilta 2017–2021. Voisiko säätösähkön historian perusteella löytää jotakin, miten säätösähkömarkkinat pystyisivät reagoimaan säätömarkkinoiden vaihteluihin sekä huomioimaan tuulivoiman vaikutukset säätömarkkinoilla.

Seuraavassa taulukossa olen tutkinut toteutuneiden alas-säätöjen määrää viiden viime vuoden ajalta 2017–2021.

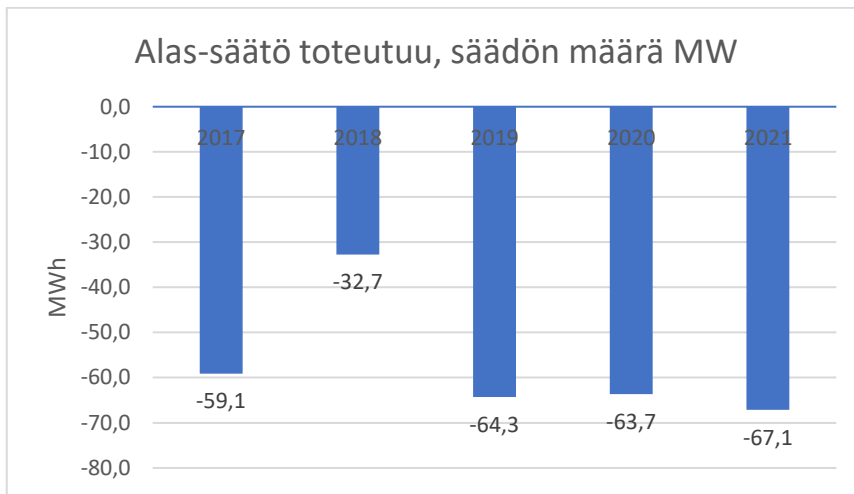


Kuva 29 Toteutuneiden ylös alas säätöjen määrä vuosittain

Kuvasta huomaamme, että vuoden aikaisten alas-säätöjen määrä on laskenut joka vuosi, vaikka tuulivoiman määrä on vuositasolla noussut ja varsinkin vuosi 2021 on ollut historiassa tuulivoiman tuotannon kannalta kaikista paras energian (MWh) määrällä mitattuna. Tuulivoiman vuosituotanto on lähes tuplaantunut viiden vuoden ajanjaksolla (kuva 28). Myös ylös-säädetyt säätösähkön määrä (h) on vuosien varrella vähentynyt noin 20 % (kuva 29). Tästä voisi päätellä, että edellispäivän elspot-markkinoille jätettyjen kulutus ja tuotanto tietojen tarkkuus on parantunut tai mahdollisesti myös pohjoismainen säätökauppa markkinan toiminta on kehittynyt tarkastelujaksolla. Säätökaupan markkinamekanismit osaavat paremmin reagoida tarvittavaan säätöön automaattisesti, jolloin manuaalista säätökaupan tarve on vähentynyt. Tämän seurauksena myös manuaalisen säätösähkön tarpeet ovat vähentyneet. Kappaleessa 3.3.1 läpi käymäni inertia ja sen mahdollinen väheneminen ei näy toteutuneessa säätökaupassa ainakaan tuntimääräisellä tasolla, vaikka tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on kasvanut.

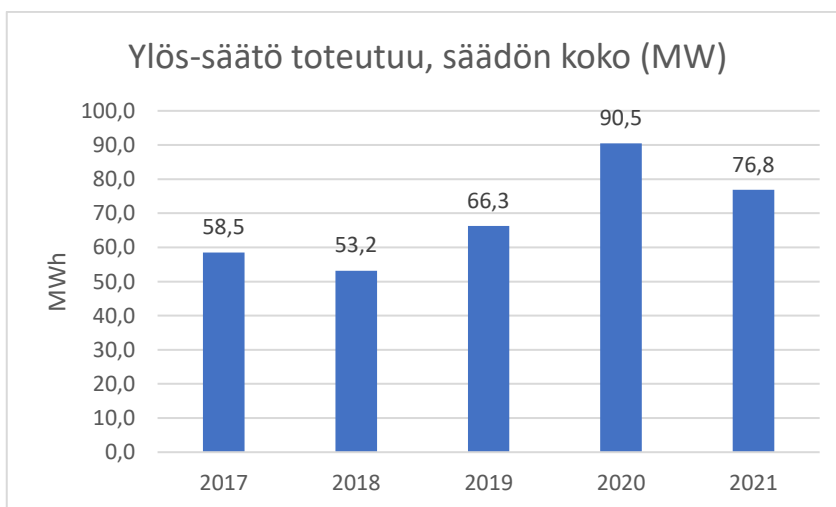
6.7 Toteutuneiden säätösähkö tarjouksien koko

Seuraavaksi tarkastellaan säätösähkön määrää silloin kun alas-säätö ja ylös-säätö toteutuu (kuva 30 ja 31). Molemmista kuvista näkee säädetyt sähkön määrän (MWh) eli MW per säädetty tunti (h).



Kuva 30 Keskimäärin toteutuneen alas-säädetyin sähkön määrä vuosina 2017–2021 (MW)

Kuvista 30 ja 31 huomataan, että vaikka alas- ja ylös-säädetyin säätösähkön määrä yksittäisinä tunteina vähentynyt niin sen energian kokonaismäärä (MWh) on hieman kasvanut. Mielenkiintoisimpana huomiona on vuosi 2020 varsinkin ylös-säädetyin sähkön määrässä. 2020 sähkön spot-hinta (kuva 32) on ollut erittäin matalalla mutta kun ylös-säätöä on säätömarkkinoilta tarvittu, sen koko on huomattavasti suurempi kuin muina vertailu jakson vuosina. Alas-säädössä vuosi 2018 on ollut säätökaupassa volyymin (määrän MWh) kannalta huomattavasti pienempi kuin muut vertailun vuodet. Miksi alas-säädetyin sähkön määrä (MWh) on ollut huomattavasti matalampi.



Kuva 31 Keskimäärin toteutuneen ylös-säädetyin sähkön määrä (MW)

6.8 Säätosähkön alas- ja ylös-säädetyin (€/MW) arvon määrittäminen

Seuraavaksi olen selvittänyt kuinka alas tai ylös-säädetyin €/MW arvo on ylös- tai alas-säädön mukaan. Tässä on keskitytty siihen, kuinka alas- tai ylös-säätö käyttäytyy ja mikä on yksittäisen alas- tai ylös-säädetyin €/MW arvo suhteessa säädettyyn keskihintaan. Tarkoituksena on selvittää €/MW, jotta voidaan vertailla, onko yksittäisen €/MW arvo korkeampi vai matalampi kuin keskihinta €/MWh. Tämä lasketaan sen takia, että onko säätosähkötarkkinoilla tärkeämpi olla mukana jokaisella säätötunnilla vai kohdentaa säätökauppa ns. kalleimmille tunneille, joissa säädön hinta ja vo-lyymi ovat korkeampia, jolloin säädettävän tunnin arvokin nousee.

Työssä käytetyt laskukaavat, jotta saadaan määritettyä €/MW

$$A_{ylös} * B_{ylös,säätöjenmäärä} = C_{summa,ylös} \quad (1)$$

Jossa $A_{ylös}$ on ylös-säätöhinta säätosähkötarkkinoilla (€/MW), $B_{ylös,säätöjenmäärä}$ on tilattu ylös säätö säätosähkötarkkinoilta (MWh) ja $C_{summa,ylös}$ on näiden keskimääräinen määrä (€/h).

$$D_{toteutuneet\ ylös} / E_{tilattu\ ylös\ säätö} = F_{summa,ylös} \quad (2)$$

Jossa $D_{toteutuneet\ ylös}$ on tilattu ylös-säätö Suomen säätosähkötarkkinoilta (MWh) ja $E_{tilattu\ ylös\ säätö}$ on kaikki ylös säädetyt tunnit (h). $F_{summa,ylös}$ on ylös-säätö toteutuu (MW).

$$\frac{C_{summa,ylös}}{E_{tilattu,ylössäätö}} = G_{summa\ €\ tuntia\ kohden} \quad (3)$$

Jossa $G_{summa\ €\ tuntia\ kohden}$ on toteutunut summa €.

$$\frac{G_{summa\ €\ tuntia\ kohden}}{F_{summa,ylös}} = H_{keskiarvo} \quad (4)$$

Jossa $H_{keskiarvo}$ On €/MW.

Vastaavasti alas-säädölle,

Työssä käytetyt laskukaavat, jotta saadaan määritettyä €/MW

$$A_{\text{alas}} * B_{\text{alas,säätöjenmäärä}} = C_{\text{summa,ylös}} \quad (5)$$

Jossa A_{alas} on alas-säätöhinta säätösähkömarkkinoilla (€/MW), $B_{\text{alas,säätöjenmäärä}}$ on tilattu alas säätö säätösähkömarkkinoilta (MWh) ja $C_{\text{summa,alas}}$ on näiden keskimääräinen määrä (€/h).

$$D_{\text{toteutuneet alas}}/E_{\text{tilattu alas säätö}} = F_{\text{summa,alas}} \quad (6)$$

Jossa $D_{\text{toteutuneet alas}}$ on tilattu alassäätö Suomen säätösähkömarkkinoilta (€/MWh) ja $E_{\text{tilattu alas säätö}}$ on kaikki alas säädetyt tunnit (h). $F_{\text{summa,alas}}$ on alassäätö toteutuu (MW).

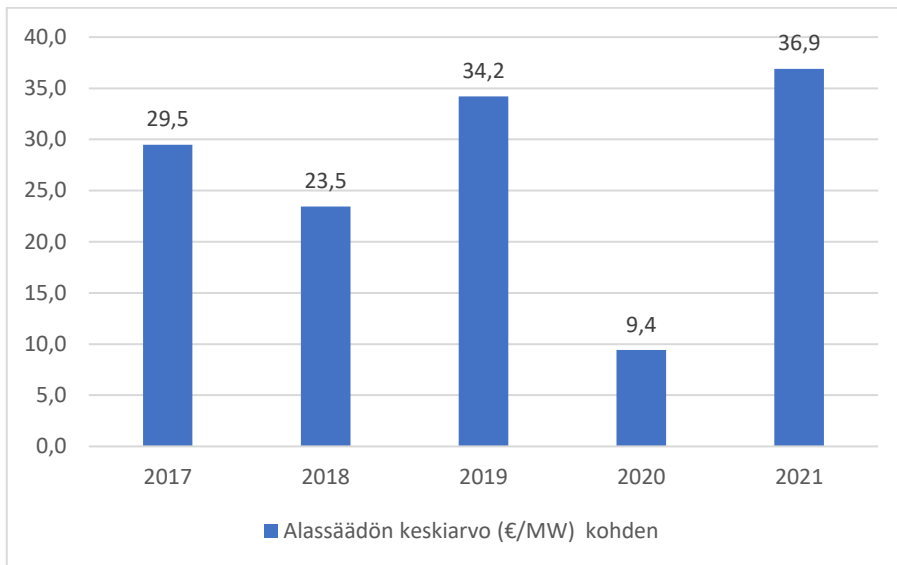
$$\frac{C_{\text{summa,alas}}}{E_{\text{tilattu alas säätö}}} = G_{\text{summa € tuntia kohden}} \quad (7)$$

Jossa $G_{\text{summa € tuntia kohden}}$ on toteutunut summa €.

$$\frac{G_{\text{summa € tuntia kohden}}}{F_{\text{summa,alas}}} = H_{\text{keskiarvo}} \quad (8)$$

Jossa $H_{\text{keskiarvo}}$ On €/MW.

Tämä lasku antaa selyyttä siihen kuinka arvokkaita ovat ison ylös säädetyt (€/h) tärkeys verrattuna kaikkiin säätösihtöön tuntien määriin, jossa manuaalisella säätösihtöllä pystyy olla mukana. Alas-säädön keskiarvoa laskee negatiiviset hinnat, jolloin tasevastaava on maksanut alassäädön tunneista koska hinta on ollut negatiivinen.

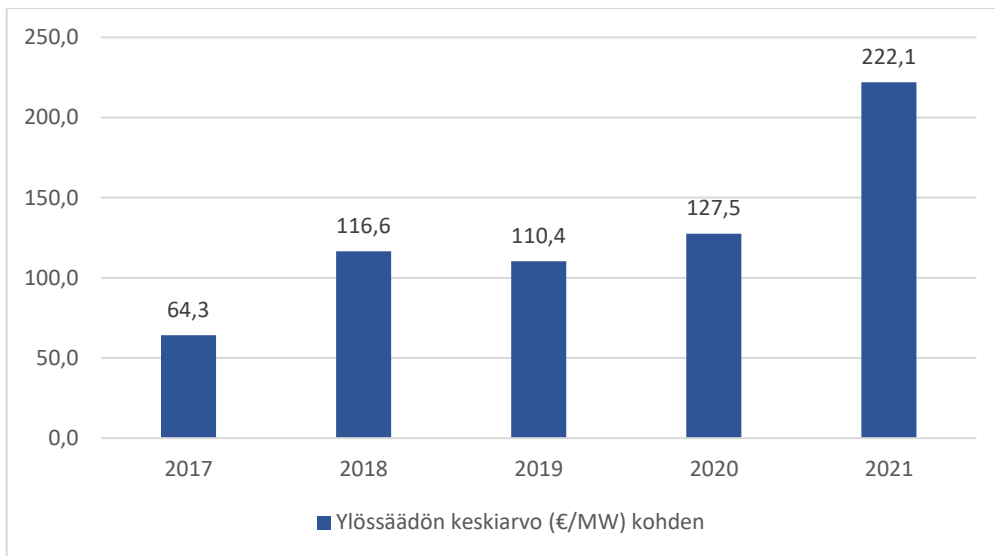


Kuva 32 Alassäädön keskiarvo €/MW kohden

Alas säädön keskiarvo €/MW on mielenkiintoisesti seurannut spot-hintaa ja sen muutoksia. Selkeästi nousee esille vuodet 2017 ja 2019, jolloin alas-säädön hinta on ollut yllättävän lähellä spot-hintaa. Vuosina 2018 ja 2021 alas-säädön keskihinta ollut vain noin puolet spot-hinnasta ja vuonna 2020 se on ollut vain kolmasosa siitä. Säättotarjoukset alas-säädölle ovat siis olleet selkeästi kauempana aluehinnasta ja markkinoiden valmiudet alas-säätöjen toteutukseen tai lähinnä tarjoukset on Fingridin toimesta jouduttu hakemaan selkeästi kauempaa. Tämä taas heijastaa sitä, että markkinoiden reagointihalukkuus on kauempana aluehinnasta. Alas-säätävät tuotteet ovat siis tuotantokustannukseltaan halpoja, eli alas säädön osalta voisi kuvitella, että voisiko siihen vaikuttaa halvat sähkönsiirto tuotteet, jotka tulevat pohjoismaisista vesivarastoista tai sitten tuulivoimaa, jolla kannattaa tuottaa sähköä aina kun vain siihen on sään osalta mahdollisuus.

Seuraavassa olen tutkinut vastaavat tiedot mutta ylös-säädölle (kuva 33). Mielenkiintoisen ylös säädön osalta tekee sen, että vuosina 2017, 2018, 2019 ja 2021 säädön toteutunut €/MW on kyseisinä vuosina aika hyvin linjassaan keskenään mutta poikkeuksen tässä tekee vuosi 2020, kun sähkön aluehinta on ollut alhaisella tasolla, niin ylös-säädetyin sähkön hinta on huomattavasti korkeampi suhteessa Elspot aluehintaan kuin muina vuosina. Ylös-säädöissä tapahtuu siis sama asia kuin alas säätöjen osalta. Tarvittavat säätötuotteet ovat kauempana kuin muina vuosina. Vaikka suomen aluehinta on ollut huomattavasti alempi kuin vuosina 2018 ja 2019 ylös-säädettävän sähkön keskihinta/megawattitunti on ollut suunnilleen samaa tasoa. Tästä voisi päätellä ylös-säädettävien tarjouksien tasoa. Eli säätökauppa ei ole riippuvainen aluehinnasta vaan sitä ohjaavat muut

vaikuttavat asiat. Viime vuosina hinnan on tarvinnut olla yli 100 €/MW, jotta ylös-säätö tarjous toteutuu. Tämä kertoo säätävän energian hinnasta, jolloin säätömarkkinoilla olevan toimijan ei ole kannattanut tarjota sähkön lisätuotantoa alle mainitun 100 €/MW. Säätö tarjoukset eivät siis ylös-säädön osalta seuraa suoraan suomen aluehintaa vaan säätävän energian hinta pysyy korkealla. Vuonna 2021 säätösähkön hinnat ylös säädölle olivat yli 200 €/MW ja lähes kaksi kertaa korkeammat kuin vuonna 2020. Sähkön aluehintaa Suomessa kolminkertaistui samaan aikaan. Suomen sähkönkulutus nousi vuodesta 2020 6 % palautuen koronan edeltävälle tasolle, joka myös näkyy sähkön suomen aluehinnassa, joka kolminkertaistui edellisestä vuodesta (Tilastokeskus, 2022).



Kuva 33 Ylös-säädön keskiarvo €/MW kohden

6.9 Säätösähkön alas- ja ylös-säädetyt (€/MWh) arvon määrittäminen

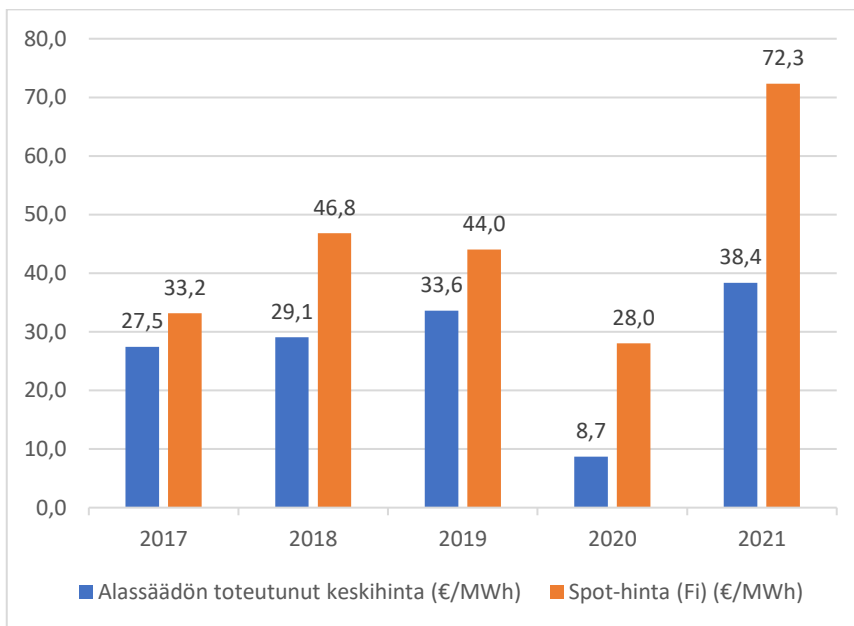
Seuraavissa kuvissa (34 ja 35) olen käynyt läpi, kuinka paljon on sähkön hinta alas- tai ylös-säätötilanteissa euroa alas säädetty tunti (h). Tämän tarkoitus on tutkia jokaisen säädön keskihintaa, kun säätö toteutuu, ottamatta huomioon suomen aluehintaa laskennassa eikä säädetyn tunnin arvoa.

Laskukaava on toteutettu

$$\frac{G_{\text{alas}}}{H_{\text{alas}}} = I_{\text{summa, alas}} \quad (7)$$

Jossa G_{alas} on kaikkien toteutuneiden alas säädettyjen tuntien summa (€/MWh) ja G_{alas} on kaikki alas säädetyt tunnit (h).

Vertailuna olen sitten tulosten analysointiin käyttänyt aluehintaa ja tutkinut onko edellisessä €/MWh kohden eroa ja keskihinnalla €/MWh paljon eroa.



Kuva 34 Toteutunut keskihinta, alas-säädetty €/MWh

Alas-säätöjen osalta tilanne pysyy melko samana, oli vertailukohtana keskiarvo hinta MWh vai hinta per jokainen säädetty MW. (vertaa kuva 32) Mutta ylös-säätöjen osalta tilanne sillä keskimääräinen säädetty MW on paljon arvokkaampi kuin säädetty MWh keskimääräisesti.

Sama vastaava vertailu on tehty myös ylös-säädölle (kuva 30). Eli laskukaava on

$$\frac{G_{ylös}}{H_{ylös}} = I_{summa,ylös} \quad (8)$$

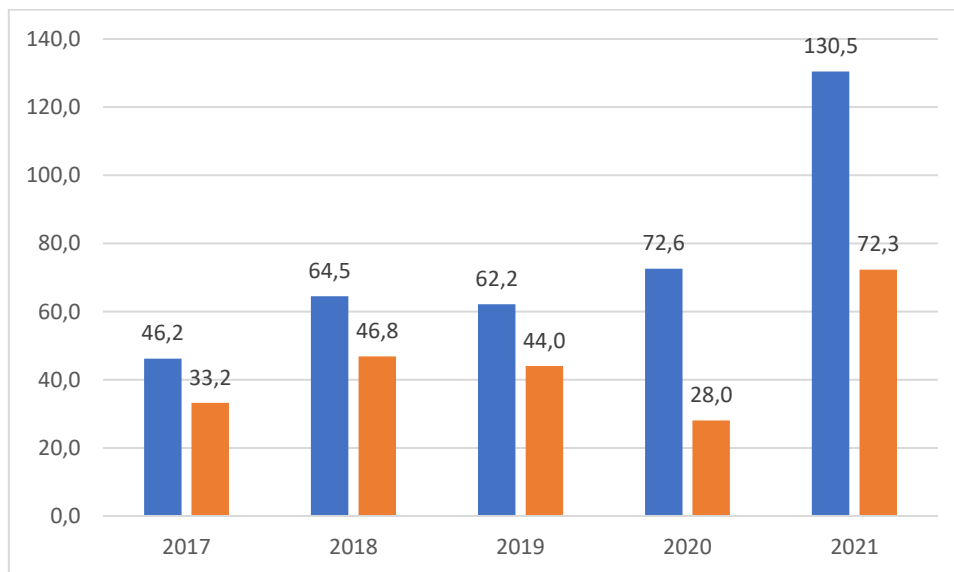
Jossa $G_{ylös}$ on kaikkien toteutuneiden alas-säädettyjen tuntien summa (€/MW) ja $H_{ylös}$ on kaikki alas säädetyt tunnit (h).

Kun otetaan huomioon vain säätöhinta markkinoilla ja ylös-säätöjen hinnat, niin niiden hintaerot ovat paljon maltillisemmat verrattuna suomen aluehintaan. Ylös-säädettävän säädön hinnat eivät

aina nouse siis hirveän korkealle ja suurin osa säätökaupasta tehdään pienillä volyyymeilla ja lähellä aluehintaa olevilla hinnoilla.

Kun sähkön säätöhinta nousee ylös, niin silloin yleensä tarvitaan suurempaa määrää myös säädettyä sähköä ja tämä näkyy heti €/MWh arvossa. Esimerkiksi Suomen sisäisillä säätösähkömarkkinoilla vuoden arvokkain tunti on ollut 11.05.2020 klo 12.00–13.00, jolloin suomen aluehinta on ollut 25,56 €/MWh mutta ylös säädön hinta on 2999 €/MW ja tilattu määrä yli 506 MW. Tällaiset esimerkit kertovat, että sähkön kulutustaseen on oltava mahdollisimman tarkasti se mitä edellisenä päivänä on ennusteessa tarjottu Day-ahead markkinoille, sillä säätösähkön hinta on ollut yli sata kertainen aluehintaan verrattuna.

Säätökauppaa käydään kuitenkin keskimäärin joka viides tunti ympäri vuoden eli säätömarkkina on varsin aktiivinen ja tarpeellinen sähköverkon tasapainottavan tekijänä. Siksi myös tasehallinnan manuaalinen toiminta on tärkeää, eikä tämä varmastikaan ole poistumassa lähitulevaisuudessa.



Kuva 35 Toteutunut keskihinta, ylös-säädetty €/MWh

Säätökaupan tuntikohtaisissa hinnoissa on tapahtunut muutos tutkitulla ajanjaksolla. Ennen vuotta 2020 säätösähkökaupat ovat toteutuneet lähempänä aluehintaa kuin vuosina 2020 ja 2021. Säätökaupan keskimääräiset hinnat ovat alas sekä ylös-säädössä karanneet kauemmas aluehinnasta, molempien säätöjen osalta.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tarkastelujaksolla 2017–2021 tutkimuksessa ei huomattu selkeää tulosta, jossa tuulivoiman määrä vaikuttaisi sääntökaupan määrään ja volyymiin. Tutkimuksessa otettu tarkasteluväli kvartaali, on liian pitkä. On olemassa jotakin yksittäisiä tunteja, jolloin tuulivoiman määrä ainakin osaltaan vaikuttaa sääntökauppaan mutta nämä ovat vain yksittäisiä tunteja ja kvartaali pitää sisällään yli 2000 tuntia, joka tarkoittaa yli 2000 tutkimushetkeä, joten yksittäiset sääntötunnit häviävät suureen tutkittavaan aineistoon. Tämä ei tarkoita sitä, että sääntökaupoille ei kannattaisi osallistua, sillä kuten tutkimuksessa huomasimme yksittäisen MW hinta voi nousta erittäin ylös ja MW arvo esimerkiksi vuonna 2021 on ollut yli 200 e/MW. Tällöin pienikin volyymi tarjottuna sääntökauppaan on tuonut yli 3 kertaa enemmän rahaa kuin aluehinnasta on saanut. Sääntökauppa ei välttämättä kestä koko säädettyä tuntia, joka on myös tärkeä ottaa huomioon sääntösähkömarkkinoilla. Tämä ei vielä kannusta osallistumaan pelkästään sääntömarkkinalle, sillä kolminkertainen hinta ei riitä siihen, että voisi tarjota vain ainoastaan sääntökauppaan osallistuvaa tuotantoa sillä markkinoilla vain alle joka neljästunti on ylös sääntöä vuoden aikana. Joten ylös säädetyn MW arvo pitäisi olla lähes 5 kertaa korkeampi kuin aluehinnan, jotta jokainen toteutunut ylös sääntö kannattaisi ja osallistuminen pelkästään sääntösähkömarkkinoille.

Tuulivoiman asennetun kapasiteetin määrä (MW) kasvu on ollut todella nopeaa ja sen takia myös sääntömarkkinoiden tulee kehittyä koko ajan, jotta etenkin häiriötilanteissa kantaverkkoyhtiö pystyy vastaamaan tarvittavaan sääntökapasiteettiin joko automaattisilla sääntötuotteilla, manuaalisilla sääntötuotteilla tai pahimmassa tapauksessa häiriöreservituotteilla. Ensimmäinen askel sääriippuvaisen tuotantomuotojen tuomaan haasteeseen ollaan ottamassa 22.05.2023 jolloin suomessa ja muualla Euroopassa otetaan käyttöön varttitase mallin ensimmäinen vaihe, jonka tarkoituksena on vastata paremmin sääherkän-tuotannon lisääntymiseen. Varttitaseella pyritään vastaamaan paremmin markkinahintojen tasapainotukseen ja sen avulla tavoitteena on saavuttaa kustannus tehokkuus sekä energia- ja ilmastotavoitteiden haasteiden mukana tuoma sääntökaupan muutokset. Tavoitteena on myös yhtenäistään eurooppalaisia energiamarkkinoita, kun koko Euroopassa on yhtenäinen taseselvitysjakso. (Fingrid, 2022d)

Tuulivoiman sääntökapasiteettia kannattaisi miettiä myös teknisessä mielessä. Tuulivoiman lisääntyessä myös mahdolliset negatiiviset hinnat voivat olla enemmän todellisuutta ja niitä on myös

markkinoilla nähty. Sähkön tuottaminen negatiivisella hinnalla ei ole millään tuotantomuodolla kannattavaa, joten negatiivisissa säätösähkön hinnoissa kannattaisi tuulivoima pysäyttää tai kehittää sähkönvarastointia jonne kulutustaseen ylittävän sähkön voisi varastoida. Myös erilaiset sähköstä tuotetaan vetyä hankkeet voivat olla varsin kannattavia negatiivisilla säätösähkön hinnoilla.

Tuulivoimaloiden ei tulevaisuudessa kannata aina tuottaa sähköä verkkoon, vaan tuulivoima yhtiöiden ja tuulivoimaa paljon omaavien yritysten kannattaisi panostaa erilaisiin varastointiratkaisuihin, jolloin ei pelkästään tuoteta aluehinnan mukaan negatiivisilla tai matalilla hinnoilla vaan säätösähkö markkinat huomioon ottaen, jolloin tuulivoiman hyödyntäminen voisi olla monipuolisempaa ja tuulivoiman tuotanto saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti.

Tulevaisuuden varttitase huomioon ottaen on entistä tärkeämpää, että tuotantolaitoksen säädettävyys on entistä nopeampaa ja esimerkiksi hiilellä tuotettu vastapainesähkö ei pysty vastaamaan varttitaseen tuomaan nopeaan säätökauppaan, jolloin nopeasti säätävät tuotantoyksiköt ovat parempia vastaamaan varttitaseen muutoksen tuomaan uudistukseen. Tuulivoiman haasteena ovat erilliset muutaman megawatin yksiköt, joiden pitäisi toimia samaan aikaan, jotta niiden säädettävyys paranisi. Muita vaihtoehtoja tuulivoimalle voisi olla paremmat siirtoyhteydet koko Euroopan alueella, jolloin sähköä voisi siirtää maiden rajojen yli ilman siirron aiheuttamia pullonkauloja ja niiden tuomia rajoitteita. Euroopassa tuuliolosuhteet vaihtelevat huomattavasti, jolloin kysyntää halvalle sähkölle löytyy aina, jos vain se pystytään siirtämään kysynnän mukaan. Kantaverkko yhtiöille tämä luo haasteita, sillä siirtoyhteyden parantamisen investoinnit ovat valtavat ja inertian siirtäminen tasasähkö verkossa ei ole mahdollista, jolloin verkon tasapainottaminen on tärkeää ja siihen tässä työssä tutkimani säätökauppa on tärkeä osa. Nykyisin Fingridillä on erittäin monenlaisia verkon tasapainotus tuotteita tarjolla ja niiden määrää ei kannata enää lisätä sillä jokaisen eri säätötuotteen käyttöön ottaminen tuotantolaitoksilla tuovat haasteita sähkön tuottajalle automaation tuomien haasteiden takia. Lisäksi eri tuotteet vaativat resursseja ja paljon testausta, jotta niiden käyttö ja käyttäminen ei muodostu liian suureksi esteeksi.

Mielenkiintoisinta tässä työssä on se, että ennen kuin aloin tutkimaan säätökauppaa, niin kuvittelin, että säätökaupan tunti määrät olisivat kasvaneet omien kokemuksieni perusteella. Mutta mikä yllätys olikaan, että säädettävientuntien määrät ovat laskeneet mutta säätökauppojen MWh määrät ovat nousseet. Eli edellisen päivän day-ahead markkinan mukana tulleet tuotanto ja kulutus taseiden poikkeama on entistä suurempi kuin aikaisemmin. Voisiko päivää edeltävää day-aheadin huuhtokauppa käytäntöä muuttaa, tai voisiko siihen rakentaa jonkinlaisen korjausmahdollisuuden lähemmäksi varsinaista käyttö tuntia.

Tutkimuksen pohjalta voisi seuraavassa vaiheessa tutkia hetkiä, jolloin säätökauppa on aktiivisimmillaan päivän sisällä, jolloin tasevastaavat voisivat suunnitella omaan tuotantoon tarkemmin näihin hetkiin ja mahdollisesti, voisivat ennakoida päivän sisäisiä tilanteita edellisenä päivänä jättämällä kulutustaseeseen hieman varaa, jotta tasevastaavat voisivat tarjota paremmin manuaalista säätökapasiteettia markkinoille. Myös kulutusjoustoparpeellisuutta voisi tutkia tarkemmin ja sen mahdollisuuksia, jotta myös tavalliset kansalaiset voisivat hyötyä säätösähkömarkkinoiden tarjoamista mahdollisuuksista. Tämän rakentamiseen tarvittaisiin automaation kehittymistä myös niin, että asiakkaat voisivat joustaa kulutustaan omalla sähkön käytöllä, jolloin se hyödyttäisi sekä tasevastaavia, että myös tavallisia kuluttajia. Sähköauton latauspisteet, lattialämmitykset, sekä kiukaat voisivat olla hyviä vaihtoehtoja yksittäisiltä kuluttajilta osallistua markkinaan. Pienistä määristä kasvaa isompi muuttaja, jolla alkaa jo olemaan vaikutusta koko markkinaan. Näiden vaikutusten mukaan ottaminen alkaa näkymään säätösähkömarkkinoissa, jolloin niiden hyödyntäminen markkinoilla nousee kysynnän ja tarjonnan tekijäksi.

Tuulivoimatuottajien on tärkeää ottaa huomioon myös sääennusteiden ennustaminen mahdollisimman tarkasti. Tulevaisuudessa tuulen ennustaminen ja kerätty tieto tuulen tiedoista ja mallinuksesta auttavat tuulivoiman ennusteen tekemisessä, jolloin myös hetkellisen tuotannon ja tuulen muutokset voidaan ottaa huomioon ennusteiden tekemisessä mahdollisimman tarkasti. Hetket, jolloin tuulen muutokset ovat muuttumassa paljon vaikuttavat myös säätökaupan määrään koska tuulen muutosten hetket ovat vaikeimmin ennustettavissa. Kasvavan tuulivoimakapasiteetin vaikutus tulevaisuudessa korostuu. Sääpalvelut ja niiden mallintaminen datan avulla voivat auttaa yrityksiä day-ahead markkinalle tarjottavan tuulivoiman tarkkuuteen ja määrään, jolloin tasepoikkeamien mahdollisuus pienenee ja myös säätökaupan yksittäisien hintojen huippujen lasku on mahdollista.

Lähteet

- Amundsen, E.S. & Bergman, L. 2006. Why has the Nordic electricity market worked so well?, *Utilities Policy*, vol 14, Issue 3, pp 148-157 (Viitattu 19.11.2022)
- Batalla-Bejerano, J. & Baute-Trojillo, E. 2016. Impacts of intermittent renewable generation on electricity system costs, *Energy Policy*, vol 94, pp 411-420 (Viitattu 04.03.2022)
- Bilgili, M., Yasar, A. & Simsek, E. 2011. Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 2 pp 905-915 (Viitattu 20.11.2022)
- Bloomberg 2019, 2019. Verkkajulkaisu. Clean energy investment is set to hit 2.6 trillion us\$ this decade. 2019. (Viitattu 8.2.2022). Ladattavissa: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-09-05/clean-energy-investment-is-set-to-hit-2-6-trillion-this-decade>
- BloombergNEF 2019, 2022. Verkkajulkaisu. BloombergNEF. New energy outlook 2019. (Viitattu 03.09.2022). Ladattavissa: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/?ref=WindEurope>
- Elia, A., Taylor, M., Gallachoir, B.o. & Rogan, F. 2020. Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers, *Energy Policy*, vol 147 (Viitattu 18.11.2022)
- Energiateollisuus ry, 2021. Verkkajulkaisu. Energiavuosi 2020 sähkö. (PDF-tiedosto) (Viitattu 12.09.2022) Ladattavissa: (Energiavuosi 2020 Sähkö)
- Energiateollisuus ry, 2022. Verkkajulkaisu. Energia vuosi 2021 sähkö. (Viitattu 15.9.2022) Ladattavissa: (https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2021_netti.pdf)
- Ely-keskus, 2020. Verkkajulkaisu. Tuulivoiman yleisopas. (PDF-tiedosto) (Viitattu 25.09.2022) Ladattavissa: ([Tuulivoiman yleisopas \(ely-keskus.fi\)](#))
- FCG, 2021. Tuulivoiman tulevaisuuden näkymät Suomessa. (Viitattu 17.06.2022) Ladattavissa: https://www.kuntaliitto.fi/sites/default/files/media/file/Kangasharju_Tuulivoiman%20tulevaisuuden%20na%CC%88kyma%CC%88t%20_Kuntien%20ilmastokonferenssi%202021.pdf

Fingrid, 2019. Verkkajulkaisu. 20 vuotta intraday-kaupankäyntiä Suomessa – Fingrid edelläkävijänä sähkömarkkinoilla. (Viitattu 15.02.2022) Ladattavissa: (20 vuotta intraday-kaupankäyntiä Suomessa – Fingrid edelläkävijänä sähkömarkkinoilla - Fingrid)

Fingrid, 2018a. Verkkajulkaisu. Mitä on inertia. (Viitattu 13.09.2022) Ladattavissa: (Mitä on inertia? - Fingrid-lehti (fingridlehti.fi))

Fingrid, 2020. Verkkajulkaisu. Nopea taajuusreservi (FFR) (Viitattu: 13.02.2022) Ladattavissa: (Nopea taajuusreservi (FFR) - Fingrid)

Fingrid, 2018b. Verkkajulkaisu. Sähköjärjestelmän matalan inertian hallinta (Viitattu 08.10.2022) Ladattavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/180612-sahkojarjestelman-matalan-inertian-hallinta.pdf>

Fingrid, 2021. Verkkajulkaisu. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) (Viitattu 14.02.2022) Ladattavissa: (Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) - Fingrid)

Fingrid, 2022a. Verkkajulkaisu. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) (Viitattu 16.02.2022) Ladattavissa: (Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) - Fingrid)

Fingrid, 2022b. Verkkajulkaisu. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) (Viitattu 10.2.2022) Ladattavissa: (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) - Fingrid)

Fingrid, 2022c. Verkkajulkaisu. Tuulivoimabuumi haastaa kantaverkon siirtokykyä länsirannikolla. (Viitattu 29.10.2022) Ladattavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/tuulivoimabuumi-haastaa-kantaverkon-siirtokyky-lansirannikolla/>

Fingrid, 2022d. Verkkajulkaisu. Varttitaseen käyttöönotto 22.5.2023. (Viitattu 23.10.2022) Ladattavissa: Varttitaseen käyttöönotto 22.5.2023 (<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/varttitase/varttitaseen-kayttoonotto-suomessa-22.5.2023-paivitetty-10.10.2022.pdf>)

Fingrid, 2022e. Verkkajulkaisu. Tuulivoiman tuotanto. (Viitattu 03.09.2022) Ladattavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoiman-tuotanto/>

Fingrid, 2022f. Verkkajulkaisu. Suomen sähköjärjestelmä. (10.10.2022) Ladattavissa: Suomen sähköjärjestelmä

Gasum, 2020. Verkkajulkaisu. Gasum Portfolio Services Oy. Selvitystyö Suomen tuulivoimasta – visio 2030. (Viitattu: 23.09.2022) Ladattavissa: (https://tuulivoimayhdistys.fi/media/selvitysty_2020_julkinen-versio-1.pdf)

- Hesamzadeh, M.R., Holmberg, P. & Safari, M. 2020. Simulation and Evaluation of Zonal Electricity Market Designs, *Electric Power System Research*, Volume 185, (Viitattu 05.03.2022)
- IEA, 2018. Verkkojulkaisu. International energy agency. World energy outlook 2018. (Viitattu 14.10.2022). Ladattavissa: <https://www.iea.org/weo2018/electricity/>
- Ilmatieteenlaitos, 2009. Verkkojulkaisu. Suomen tuuliatlas - tuulitiedot Suomen kartalla (Viitattu: 05.02.2022) Ladattavissa: Tuuliatlas - Ilmatieteen laitos
- IRENA 2019. Verkkojulkaisu. International renewable energy agency. Global energy transformation – Future of wind. 2019. (Viitattu 11.10.2022). Ladattavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf
- Koivunen, T., Syri, S. & Veijalainen, N. 2021. [Tutkimusartikkeli]. V Contributing factors for electricity storage in a carbon-free power system (Viitattu 19.11.2022) Ladattavissa: Sähkön varastointiin vaikuttavat tekijät hiilivapaassa sähköjärjestelmässä - Koivunen - 2022 - International Journal of Energy Research - Wiley-verkkokirjasto (lut.fi)
- Motiva, 2022a. Verkkojulkaisu. Tuuliatlas – tuulisuustiedot kartalle. (Viitattu 18.02.2022) Ladattavissa: (Tuuliatlas – tuulisuustiedot kartalle - Motiva)
- Motiva, 2022b. Verkkojulkaisu. Tuulivoimateknologia. (Viitattu: 20.09.2022) Ladattavissa: (https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia)
- Nord Pool, 2008. List of changes in day-ahead and intraday areas (PDF-tiedosto). (Viitattu: 13.01.2022) Ladattavissa: Memo (nordpoolgroup.com)
- Nord Pool, 2020a. Verkkojulkaisu. Price calculation. (Viitattu 15.01.2022) Ladattavissa: (<https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/>)
- Nord Pool, 2020b. Verkkojulkaisu. The Nordic power markets. (Viitattu 02.01.2022) Ladattavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/>
- Nord Pool, 2020c. Verkkojulkaisu. Price formation. (Viitattu 02.02.2022) Ladattavissa: [Price formation | Nord Pool \(nordpoolgroup.com\)](#)
- Nord Reg, 2019 Verkkojulkaisu. An overview of the Nordic Electricity Market (Viitattu 14.03.2022) Ladattavissa: [An overview of the Nordic Electricity Market | NordREG \(nordicenergyregulators.org\)](#)

Sihvonen, 2020. SUOMEN ENERGIAJÄRJESTELMÄN JOUSTOTARPEET JA -MAHDOLLISUUDET 2035 (Viitattu 26.11.2022) [Diplomityö] Ladattavissa: Suomen energiajärjestelmän joustotarpeet ja -mahdollisuudet 2035 (lut.fi)

SLL, 2022. [PDF-tiedosto] Luonnonsuojeluliiton tuulivoimaopas (Viitattu 19.11.2022) Ladattavissa: https://www.sll.fi/app/uploads/2022/02/SLL_tuulivoimaopas_2022_web.pdf

Spodniak, Ollikka & Honkapuro. 2021. The impact of wind power and electricity demand on the relevance of different short-term electricity markets: The Nordic case, Applied Energy, Vol 283 (Viitattu 02.03.2022)

Sornakaes, Andersen, Tang & Ström. 2013. Market integration of wind power in electricity system balancing pages, Energy Strategy Reviews, Vol 1, Issue 3, pp 174-180 (Viitattu: 20.11.2022)

Suomen tuuliatlas, 2010. Suomen tuuliatlas yhteenvetoraportti. (PDF-julkaisu) (Viitattu 07.02.2022) Ladattavissa: SUOMEN TUULIATLAS (fmi.fi)

Suomen tuulivoimayhdistys, 2022. Verkkojulkaisu. Tuuli ja Tuulivoima. (Viitattu: 04.02.2022) Ladattavissa: (Tuuli ja tuulivoima - Suomen Tuulivoimayhdistys)

Tilastokeskus, 2022. Verkkojulkaisu. Sähkön kokonaiskulutus kasvoi 6 % vuonna 2021. (Viitattu 22.10.2022) Ladattavissa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cku5h6iao1vzd0b06zowq5vqg>

Tuulivoimayhdistys, 2022a. Verkkojulkaisu. Rakenteilla olevat hankkeet. (Excel-tiedosto) (Viitattu: 05.03.2022) Ladattavissa: (<https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/rakenteilla-olevat-hankkeet>)

Tuulivoimayhdistys, 2022b. Verkkojulkaisu. Tuulivoiman vaikutukset sähköverkkoon. (Viitattu 15.09.2022) Ladattavissa: (<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-vaikutukset-sahkoverkkoon>)

Tuulivoimayhdistys, 2022c. Verkkojulkaisu. Tuulivoimaennusteita. (Viitattu 10.09.2022) Ladattavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>

WWEA 2018, 2021. Verkkojulkaisu. World wind energy association. Global total installed capacity [MW], 2018. (Viitattu 14.10.2022). Ladattavissa: <https://library.wwindea.org/global-statistics-1980/>

Yle uutiset, 2022. Suomessa pörssisähkö on ajoittain jopa sata kertaa kalliimpaa kuin Pohjois-Ruotsissa – syynä hinnoitteluperiaate, jota Suomi ei halua (Viitattu: 5.10.2022) Ladattavissa: (<https://yle.fi/uutiset/3-12580462>)

Zakeri, B. & Syri, S. 2015. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 42, pp 569-596 (Viitattu 19.11.2022)