



Tuulituotannon ennustaminen sähkö- markkinoilla

Juha Nykänen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

Nykänen, Juha

Tuulituotannon ennustaminen sähkömarkkinoilla

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2021, 33 sivua

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Tuulivoimaa on tulossa sähkömarkkinoille lisää huomattavalla nopeudella. Vuonna 2020 Suomeen asennettu tuulivoimakapasiteetti oli 2585 megawattia, ja ennusteiden mukaan vuonna 2030 se on jo 7000–9000 megawattia. Tuulella tuotetun sähkön tuotanto vaihtelee sään mukaan, eikä noudata sähkön kuluttajien tarpeita.

Gasum Oy toimii tasevastaavana sähkömarkkinoilla, ja asiakkaanaan Gasumilla on muutamia tuulipuistoja. Tulevaisuuden markkinoilla lisääntyvä tuulivoima huomioiden, on tarpeen pystyä parantamaan tuulipuistojen tuotantoennusteita. Paremmat ja tarkemmat tuotantoennusteet johtavat pienempiin tasevirheisiin taseselvityksissä, ja tasehinnan vaihteluun liittyvä riski pienenee. Tutkimustyön tavoitteena oli parantaa tuulituotannon ennusteita.

Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena, jossa hyödynnettiin kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Tuulia ja säätä, sekä niiden ennustamisen perusteita tutkittiin eri kirjallisuuslähteistä. Myös aikasarjoja ja aikasarja-analyysia, jotka liittyvät vahvasti ennustamiseen, tutkittiin eri lähteistä. Sähkömarkkinoista koottiin perustiedot, jotta erilaisten ennusteiden tarpeet tulevat ilmi. Tietoja yhdistelemällä pystyttiin kokoamaan ennustusprosessin eri vaiheet yhteen, ja pohtimaan eri markkinoiden osa-alueiden tarpeisiin käytettävien ennusteiden tekemistä.

Työn tuloksena saatiin säätilan ennustamiseen liittyvät haasteet koottua eri vuodenajoille, tiivistelmä sähkömarkkinoiden toiminnasta sekä yleistä tietoa ennustamisesta prosessina ja tuulivoimasta ja sen määrän kasvusta sähkömarkkinoilla tulevaisuudessa. Tuulituotannon ennusteiden parantamiseksi tärkeimmät toimenpiteet tutkimuksen perusteella ovat mahdollisimman usein ja mahdollisimman tuoreilla tiedoilla tehdyt ennusteet. Day-ahead markkinaa varten tehdyt ennusteet on pisimmillään ulotuttava jopa 35 tunnin päähän tulevaisuuteen, joka alkaa olla jo tuuliennusteiden paikkansapitävyyden rajoilla. Päivänsisäistä markkinaa varten on olemassa jo tuoremmat sääennusteet ja tuulituotantoennusteet saatavilla, ja lisäksi reaaliaikamittauksia voidaan hyödyntää lähituntien ennusteissa.

Avainsanat (asiasanat)

Tuuli, Tuulivoima, Sähkömarkkinat, Ennustaminen, Aikasarjat

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Nykänen, Juha

Forecasting wind power production for electricity markets

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2021, 33 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Wind power is increasing rapidly in the electricity markets. On year 2020, the wind power capacity installed to Finland was 2585 megawatts, and it is predicted to be as much as 7000–9000 megawatts in the year 2030. The electricity produced with wind varies a lot according to the weather and does not follow the needs of electricity consumers.

Gasum Oy acts as a balance responsible party in the electricity markets, and as customers Gasum has a few wind farms. On the future markets, taking into account the increasing amount of wind power, there is a need for improving the wind power production forecasts. Better and more accurate production forecasts lead to smaller balance errors, and the risk associated to balance electricity's price decreases. The objective of the thesis work was to make the wind power production forecasts better.

The thesis work was done as a development study, where qualitative research methods were used. Winds and the weather, as well as the basics of their forecasting were studied from different literature sources. Time series and time series analysis, which have a lot to do in forecasts, were also studied from different sources. The basics of electricity markets were also introduced in the work, so the different needs in different market platforms could be established. Combining information from different sources, it was possible to reflect and produce the forecasting process for the different market platforms.

As the result of the work, the difficulties in forecasting the weather in different seasons were gathered and a summary of the electricity markets was done. Also, information of forecasting as a process, information of wind power, and the growth of wind power in the electricity markets in the future was also done. To get better forecasts concerning the wind power production, the most important thing to do is to forecast as often as possible, and to use the most recent and up-to-date information and weather forecasts available. Forecasts done for the day-ahead market need to reach up to 35 hours to the future, which starts to be the limit of how far winds as a weather phenomenon can be forecasted. For intraday market, the forecasts for weather and wind production are fresh and made with recent data, and real time data is available from the ongoing and past hours.

Keywords/tags (subjects)

Wind, Wind power, Electricity markets, Forecasting, Time series

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Tuuli ja tuulivoima	7
2.1	Tuuliprofiili	9
2.2	Tuulivoima Suomessa.....	10
2.2.1	Tuulivoiman tuotanto Suomessa 2020.....	12
2.2.2	Tulevaisuuden näkymät.....	12
3	Ennustaminen ja aikasarja-analyysi.....	13
3.1	Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen ennustaminen.....	14
3.1.1	Regressiomalli	14
3.1.2	Tasointumalli	15
3.1.3	Yleiset aikasarjamallit	16
3.2	Ennustaminen prosessina	16
4	Sään ennustaminen ja tuulituotanto	19
4.1	Sään ennustaminen yleisesti.....	20
4.2	Eri vuodenaikojen tuomat haasteet tuulten ennustamiseen	21
4.2.1	Talven sää	22
4.2.2	Kevään sää	23
4.2.3	Kesän sää	23
4.2.4	Syksyn sää	23
5	Tuulivoima sähkömarkkinoilla	24
5.1	Day-ahead markkinat	25
5.2	Intraday markkinat.....	26
5.3	Reservimarkkinat.....	27
6	Pohdinta ja tulokset.....	28
6.1	Ennustaminen day-ahead markkinoilla.....	29
6.2	Ennustaminen intraday markkinoilla	30
6.3	Tuotantosuunnitelmat Fingridille	30
6.4	Säätömarkkinoille osallistuminen	31
	Lähteet	32
Kuviot		
	Kuvio 1. Ilmakehän kiertoliike	8
	Kuvio 2. Tuuliprofiili kolmella eri gradientin arvolla	10

Kuvio 3. Asennettu kumulatiivinen kapasiteetti	11
Kuvio 4. Sähkön tuonti ja vuoden 2020 tuotanto	12
Kuvio 5. Datan arvojen tasoittamisen prosessi.....	16
Kuvio 6. Ennustamisen prosessi.....	17
Kuvio 7. Kuvitteellisen tuotantoyksikön keskitehokuvaaja	19
Kuvio 8. Tuulituotanto Suomessa kuukausittain	21
Kuvio 9. Tuntihinnan muodostuminen Day-ahead markkinalla	26
Kuvio 10. Reservimarkkinat Suomessa	27

Taulukot

Taulukko 1. Kuvitteellisen tuotantoyksikön keskiteho	18
--	----

1 Johdanto

Uusiutuvan energian tuotantoa pyritään kasvattamaan jatkuvasti niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi vuodelle 2030 kasvattaa uusiutuvan energian osuutta energian loppukulutuksesta 32 % käyttäen vuotta 1990 vertailuvuotena. Vuoden 2020 tavoite, eli 20 % kasvu, oli jo lähes saavutettu vuonna 2018: uusiutuvan energian osuus oli kasvanut jo 18 % vertailuvuoteen verrattuna. (Renewable energy in the EU in 2018 2020).

Uusiutuvan energian perässä ei olla pelkästään EU:n asettamien tavoitteiden, ympäristön hyvinvoinnin, tai kestäväen kehityksen takia. Energian uusiutuvuus tuo etua sekä tuottajan että käyttäjän imagolle. Suomi on lähtenyt vahvasti mukaan uusiutuvan energian käytön lisäämiseen, ja tavoitteena Suomella onkin olla vuonna 2035 hiilineutraali ja fossiilivapaa yhteiskunta (Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi 2019). Yksi nopeimmin lisääntyneistä uusiutuvan energian muodoista suomessa on tuulivoima. Opinnäytetyössä keskitytään tuulivoimalla tuotettuun sähkөөn.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Gasum Oy, joka on pohjoismainen energiayhtiö ja kaasualan sekä energiamarkkinoiden toimija. Gasum Oy toimii muun muassa sähkömarkkinoilla tasevastaavana. Voidakseen toimia sähkömarkkinoilla on jokaisen osapuolen, kuten tuulituottajan, huolehdittava jatkuvasti sähkötaseestaan eli ylläpidettävä sähkön tuotannon/hankinnan ja kulutuksen/myynnin välinen tehtasapaino. Käytännössä kuitenkin osapuoli ei pysty täydelliseen tasapainoon, vaan sillä on oltava avoin toimittaja, joka tasapainottaa osapuolen sähkötaseen. Tasevastaava on osapuoli, jonka avoin toimittaja on Fingrid (Tasepalvelu 2021). Opinnäytetyö on kirjoitettu tasevastaavan näkökulmasta, ja pääosin työ käsittelee fyysisiä sähkömarkkinoita ja tuulivoiman toimintaa niillä.

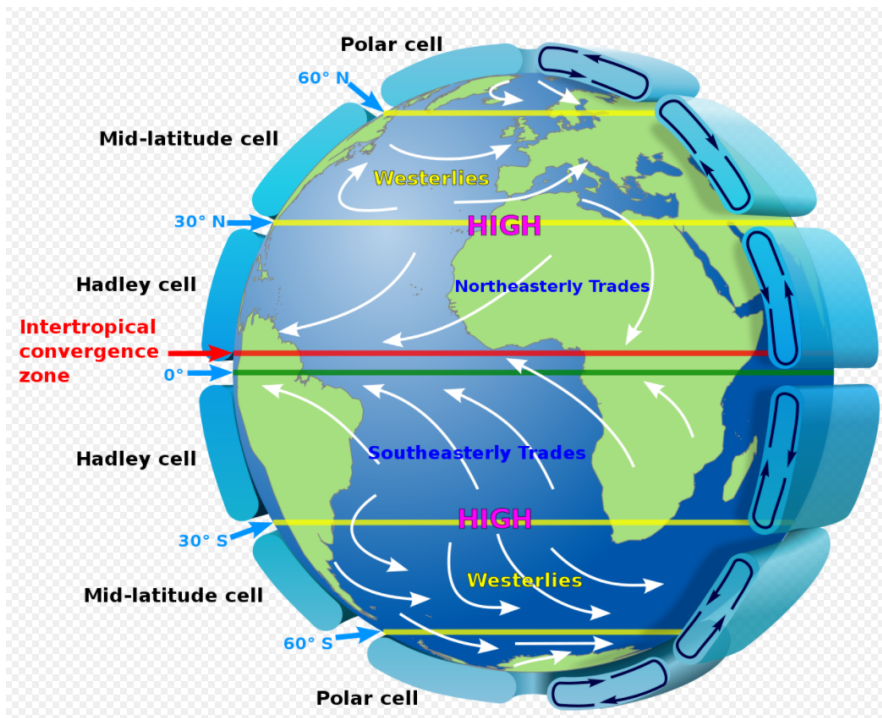
Jotta tuotannoltaan vaihtelevaa tuulivoimalla tuotettua sähkөөä voi hyödyntää sähkömarkkinoilla, on tarpeellista pystyä ennustamaan sen tuotantoa. Opinnäytetyössä perehdyttiin tuuleen energianmuotona ja sähköntuotantoon tuulesta. Myös säähän ja erityisesti tuuliin perehdyttiin työssä. Säättä ennustetaan jatkuvasti eri alojen tarpeisiin, ja myös sähkömarkkinoiden toimintaan sääennusteet liittyvät vahvasti. Ennustamisen perusteita, aikasarjoja ja data-analytiikkaa tutkittiin myös. Työssä käytiin myös läpi sähkömarkkinoiden toimintaa, ja erityisesti alueita sähkömarkkinoilta joihin tuulivoima liittyy.

Opinnäytetyön lähtökohtana oli tuulivoiman voimakas lisääntyminen sähkömarkkinoilla, ja tavoitteena tuulituotantoennusteiden parantaminen, jotta riskit sähkömarkkinoilla sataisiin pienemmäksi. Työ toteutettiin kvalitatiivisena kehittämistutkimuksena, perehtyen alan kirjallisuuteen ja tutkimuksiin. Työssä otettiin huomioon eettisyys muun muassa kirjaamalla lähteet näkyviin.

2 Tuuli ja tuulivoima

Tuuli on ilman liikettä ilmakehässä. Landbergin (2015, 20) mukaan tuuli on seurausta siitä, että maapallon napoja kohti mennessä maahan auringosta saapuva energiamäärä pinta-alaa kohti pienenee. Tästä johtuen energiaa kertyy enemmän päiväntasaajalle. Termodynamiikan toisen lain mukaan näin ei voi olla, ja Landbergin (2015, 20) mukaan tämä näkyykin siten, että päiväntasaajalla lämmin ilma nousee ja navoilla oleva kylmempi ilma painuu alemmas, muodostaen näin virtauksen, jonka tarkoituksena on siirtää lämpöä päiväntasaajalta navoille, toisin sanoen järjestelmä pyrkii tasapainoon.

Tuuli ei läheskään aina pohjoisella pallon puoliskolla puhalla etelästä pohjoiseen, ja päinvastoin eteläisellä pallonpuoliskolla. Landbergin (2015, 22) mukaan tämä johtuu maapallon pyörimisestä, joka aiheuttaa Coriolis-ilmiön. Coriolis-ilmiötä esiintyy fluidin liikkeessä pyörivällä alustalla. Tämän ilmiön takia ilma usein pyörii matalapaineessa vastapäivään pohjoisella pallonpuoliskolla. Ei ole mahdotonta, ettei syntyisi matalapaineita, joissa ilma pyörisikin myötäpäivään, mutta tällöin ilman kitka heikentää matalapainetta niin että se kuihtuu pois. Kuviossa 1 on esitelty ilman tyypillinen kiertosuunta ilmakehässä.



Kuvio 1. Ilmakehän kiertoliike (Kaidor 2013)

Tuuli ei siis ole pelkästään ilman liikettä yhteen ja samaan suuntaan. Tuulta voidaankin mitata monella eri tavalla. Kenties tärkein mittalaite tuuleen liittyen on anemometri, ja tyypillisin tuulennopeuden mittaamiseen käytetyistä anemometreistä on kuppianemometri. Se on laite, jossa on yleensä kolme kuppia kiinnitettynä pyörivään varteeseen, ja varren pyörimisnopeudesta saadaan laskettua tuulen nopeus. Toinen yleisimmistä ja tärkeimmistä mittalaitteista on tuuliviiri, jolla saadaan tuulen suunta selville muutaman asteen tarkkuudella. Kolmas tärkeimmistä mittalaitteista on lämpömittari. Neljäs tärkeistä mittalaitteista on barometri eli ilmapuntari. (Landberg 2015, 80–104). Näillä neljällä mittauksella saadaan paljon tietoa tuulesta, eli tuulen nopeus, suunta, lämpötila ja ilmanpaine.

Yksi tärkeä mittaus, joka ei liity suoraan tuuleen, vaan tuulipuiston sähköntuotantoon on ns. reaaliaikamittaus, jolla tuulipuiston tasevastaava saa puiston sähköntuotannosta tietoa lähes reaaliajassa, useimmiten yhden tai kolmen minuutin välein. Tätä mittausta hyödynnetäänkin usein ennustamaan tulevien tuntien tuotantoa, esimerkiksi ottamalla keskiarvo viimeisten mittausten tehosta ja ennustamalla tätä seuraavalle tunnille.

Osa tuulen kineettisestä energiasta saadaan muunnettua generaattorin avulla sähköksi. Ilman sisältämä kineettisen energian määrä voidaan kirjoittaa kaavan 1 muotoon:

$$E = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (1)$$

jossa E on energia, A on pinta-ala kohtisuoraan ilman virtausta vasten, ρ on ilman tiheys ja v on ilmavirran nopeus. (Landberg 2015, 28). Vaikka ilman tiheys vaihtelee lämpötilan mukaan, on vaihtelu niin pientä, ettei sillä ole juuri tuulivoiman tuotannon kannalta vaikutusta. Tärkeimmät tekijät tuulivoiman tuotannon kannalta ovatkin pinta-ala, eli tuulivoimalan lapojen kattama pyörintäpinta-ala, sekä tuulen nopeus. Tämän takia viime aikojen trendinä onkin ollut kasvattaa voimaloiden kokoa, ja puiston rakennuspaikkaan kiinnitetäänkin yhä enemmän huomiota, jotta tuulisuus alueella olisi mahdollisimman hyvä.

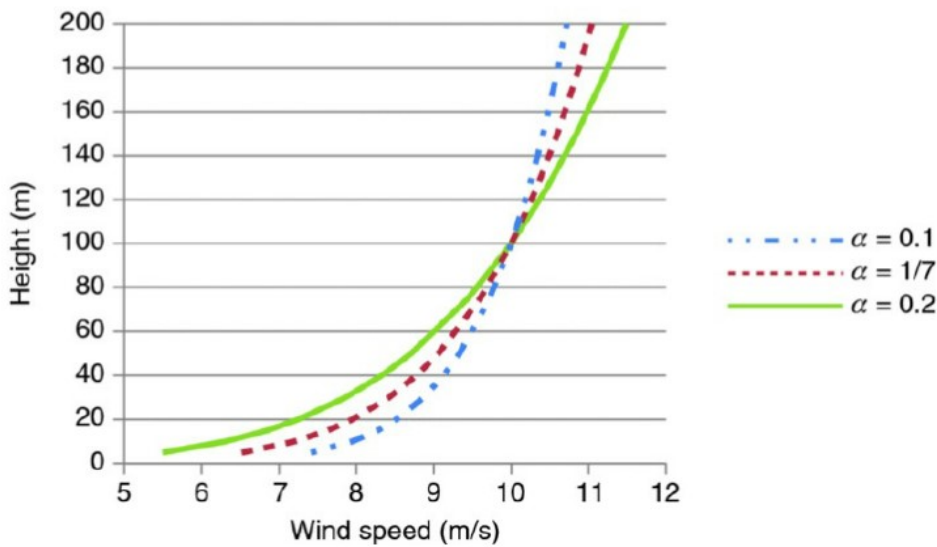
Vuonna 1920 saksalainen tiedemies Albert Betz julkaisi matemaattisen analyysin tuuliturbiinin teoreettisen hyötysuhteen maksimista. Tuloksen mukaan tuuliturbiini voi ottaa talteen sen läpikulkevan ilman kineettisestä energiasta maksimissaan 16/27 eli noin 59,3 %. Nykyäänkin tuuliturbiinit ottavat talteen parhaimmillaankin vain 50 % tuulen energiasta. (Schaffarczyk 2014, 38.)

2.1 Tuuliprofiili

Yksi tärkeimmistä tuulivoiman tuotantoon liittyvistä asioista on Landbergin (2015, 106) mukaan tuuliprofiili. Tuuliprofiili tarkoittaa maantasolla olevan tuulen nopeuden yhteyttä ylempänä maanpinnan päällä olevan tuulen nopeuteen. (Landberg 2015, 106). Tuulen nopeus tietyllä korkeudella voidaan kirjoittaa kaavan 2 muotoon:

$$u(z) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha, \quad (2)$$

jossa $u(z)$ on tuulen nopeus korkeudella z , u_r on tuulen nopeus referenssikorkeudella z_r , ja α on tuuligradietti, eli kerroin joka vaihtelee ilmakehän tilan mukaan, tyypillinen arvo normaalille gradientille on 1/7 (Landberg 2015, 112). Kuviossa 2 on esitettyinä kolmella eri α :n arvolla tuuliprofiili sadan metrin korkeudella mitatulle tuulelle.



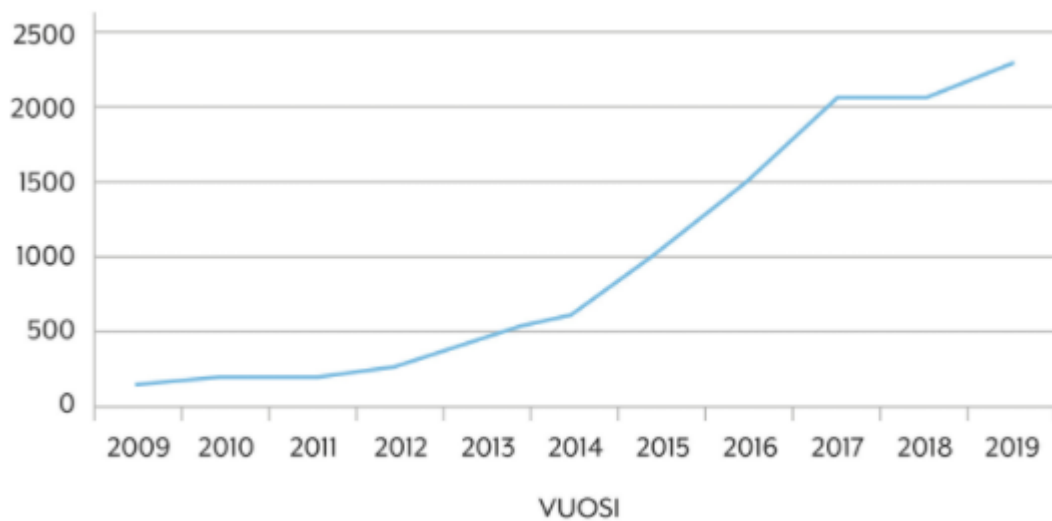
Kuvio 2. Tuuliprofiili kolmella eri gradientin arvolla (Landberg 2015, 113)

Kuviosta näkee hyvin, että mitä korkeammalle maan pinnasta mennään, sitä suurempi tuulennopeus on. Vastaavasti maan tasolla tuulen nopeus on erittäin pieni. Kuvaajasta näkee myös hyvin, että maanpinnan lähellä on tuulennopeuden muutos paljon suurempi kuin ylemmäksi mennessä. Landbergin (2015, 136) mukaan kuviossa 2 esitettyä yksinkertaistettua tuuliprofiilia ei kuitenkaan voi käyttää jokaisen tuulipuiston kohdalla, vaan aina on otettava huomioon muun muassa ympäröivät metsät ja maastonmuodot, sekä vallitseva säätilanne.

2.2 Tuulivoima Suomessa

Tuulivoimaa on hyödynnetty Suomessa jo 1900-luvun alusta asti. Aluksi tuulta hyödynnettiin tuulimyllyillä jyvien jauhamiseen ja pumppaamiseen, mutta vuonna 1986 Imatran voima yhdisti ensimmäisen tuulivoimalan sähköverkkoon (Suomalaisen tuulivoiman historia 2021). Vasta viime vuosina on tuulivoima kasvattanut suosiotaan kuten kuviosta 3 näkee. Kuviossa Y-akselilla on

Suomeen asennettu kapasiteetti megawateissa.



Kuvio 3. Asennettu kumulatiivinen kapasiteetti (Tuulivoima suomessa 2021).

Vuonna 2011 maaliskuussa tuli voimaan uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki, eli syöttötariffijärjestelmä. 1.11.2017 alkaen syöttötariffijärjestelmä on sulkeutunut uusien tuulivoimaloiden osalta. Tuulivoimaloille, jotka on hyväksytty syöttötariffijärjestelmään, maksetaan tavoitehinnan, eli 83,5 €/MWh, ja sähkön markkinahinnan erotuksen mukaista tukea. (Tuet tuulivoiman rakentamiselle 2020).

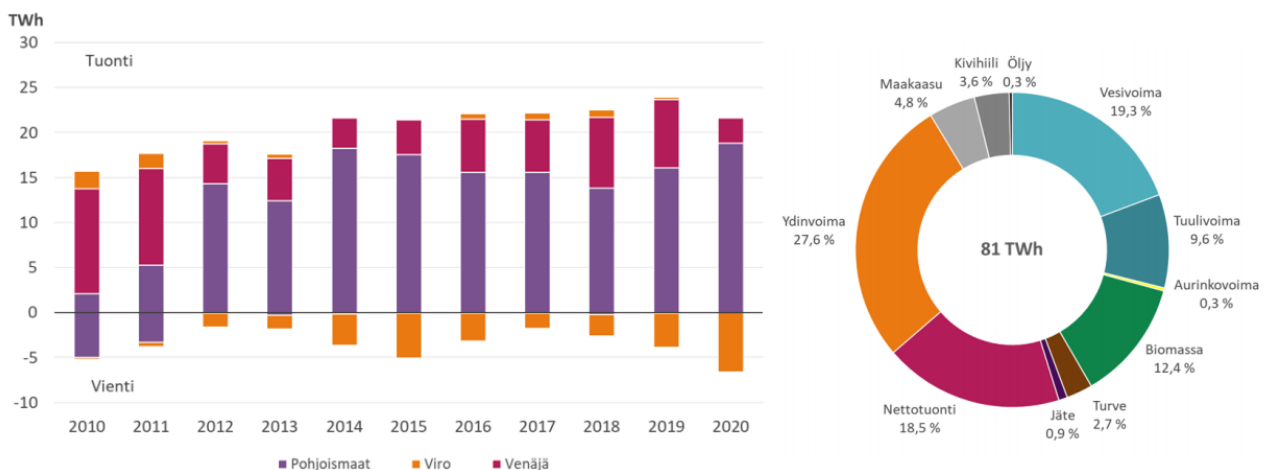
Tuulivoimaloiden rakentaminen on kuitenkin nykyään jo ilman tukiakin kannattavaa, ja jo vuonna 2018 julkaistiin ensimmäinen tuulivoimainvestointipäätös, joka oli täysin markkinaehtoinen. Aiemmin mainitun imagoedun lisäksi myös tuulivoiman poliittinen vakaus, tai turvallisuus, on omiaan lisäämään yritysten ja sijoittajien innokkuutta tuulivoimaa kohtaan. Viime vuosina on yleistyneet myös sopimukset, joilla ostetaan tuulipuiston tuotanto osittain tai kokonaan ennalta sovittuun hintaan. Näitä sopimuksia kutsutaan PPA-sopimuksiksi (Power purchase agreement).

Tuulivoimalla tuotettiin Suomessa vuonna 2019 melkein 6 TWh sähköä. Kokonaisuudessaan sähköä kulutettiin 86 TWh (Energiavuosi 2019 Sähkö 2020). Tuulivoimapuistojen yhteenlaskettu kapasiteetti vuonna 2019 oli 2284 MW, ja helmikuussa 2020 Suomessa oli julkaistu tuulivoimahankkeita noin 18 500 MW:n edestä. Tulevaisuudessa siis yhä suurempi osa suomessa käytetystä sähköstä on tuotettu tuulivoimalla.

Vaikka tuulivoima onkin uusiutuva energianmuoto ei sekään ole täysin haitatonta. Niin sähkömarkkinoiden, sähköverkon kuin sähkön kulutus- ja tuotantotapojen on muututtava joustamattoman uusiutuvan tuotannon lisääntyessä. Opinnäytetyössä keskitytään tuulituotantoon sähkömarkkinoiden näkökulmasta: tavoitteena on esitellä lukijalle sähkömarkkinoiden toimintaa ja sitä, mitä kaikkea tuulivoiman osallistuminen markkinoille edellyttää.

2.2.1 Tuulivoiman tuotanto Suomessa 2020

Tuulivoimalla tuotettiin Suomessa vuonna 2020 melkein 7,8 TWh sähköä (Fingrid avoin data 2021). Vuoden 2020 Kokonaissähkönhankinta oli noin 81 TWh, ja suomessa tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus tästä oli 9,6 %. Tuulivoiman asennettu kapasiteetti 2020 oli 2585 MW. Kapasiteetin kasvua edelliseen vuoteen oli siis 13 prosenttia, ja tuotanto kasvoi 29 prosenttia. Kuviossa 4 on esitettyä Suomeen tuodun sähkön määrä, ja ympyräkuviossa vuoden 2020 sähkötuotanto ja nettotuonti.



Kuvio 4. Sähkön tuonti ja vuoden 2020 tuotanto

2.2.2 Tulevaisuuden näkymät

Suomi on sähkön suhteen aliomavarainen, tarkoittaen että tuotanto ei pysty kattamaan sähkönkulutusta. Kuvioista 4 näki että sähkön tuonti ei ole ollut aivan viime vuosien trendi, vaan on jatkunut jo pidempään suomessa. Vuonna 2022 valmistuvan Olkiluoto 3 -ydinvoimalan avulla päästään lähemmäs omavaraisuutta, mutta korkeimman kulutuksen aikaan joudutaan todennäköisesti vieläkin tuomaan sähköä muualta. Tuulivoimaa rakennetaan kuitenkin koko ajan Suomeen huimalla

vauhdilla, ja Sjöblomin (2021, 8) ennusteen mukaan tuulivoiman kapasiteetti vuonna 2030 olisikin jo 7000–9000 MW, ja tuotanto olisi vuositasolla noin 30 TWh. Riippuen sähkönkulutuksen kasvusta, tällä määrällä yhdistettynä muuhun tuotantoon Suomessa päästään omavaraiseksi sähkön tuotannon suhteen.

3 Ennustaminen ja aikasarja-analyysi

Montgomeryn, Jenningsin ja Kulahcin (2015, 2) mukaan ennuste on arvaus jostain tulevaisuuden tapahtumasta tai tapausten sarjoista. Ennustaminen on monelle eri alalle kuten teollisuudelle, kaupankäynnille, taloudelle, ympäristötieteille, rahoitusosalalle ja politiikalle tärkeä menetelmä. Montgomeryn ja muiden mukaan ennusteiden tyypit voidaan jakaa kolmeen eri osaan: pitkiin, keskipitkiin ja lyhyen aikavälin ennusteisiin. Lyhyen aikavälin ennusteet kattavat yleensä ajanjakson päivistä kuukausiin, näitä sähkömarkkinoilla tuulivoiman näkökulmasta voisi olla esimerkiksi tuotantoennusteet seuraavalle päivälle. Tuotantoennusteissa hyödynnetään muun muassa säähän ja säätilaan liittyviä ennusteita, ja myös mahdolliset tulevat huoltoseisokit ja niiden kesto ovat lyhytaikaisia ennusteita. Keskipitkät ennusteet ulottuvat parin vuoden päähän, ja pitkän aikavälin ennusteet ulottuvat hyvinkin pitkälle tulevaisuuteen. Keskipitkiä ja pitkän aikavälin ennusteita tarvitaan tuulivoiman osalta muun muassa puiston suunnitteluvaiheessa, mahdollisia ppa-sopimuksia solmiessa, ja tulevaa tuotantoa arvioitaessa.

Useisiin ongelmiin, joihin etsitään ratkaisua ennustamisella, liittyy vahvasti aikasarjat. Boxin, Jenkinsin, Reinsel ja Ljunging (2016, 1) mukaan aikasarja on sarja havaintoja kronologisessa järjestyksessä. Myös Avikesh ja Prakash (2017) korostavat, että jotta aikasarjaa voisi hyödyntää analysoissa ja koneoppimisessa on datan oltava kvantitatiivisia havaintoja liittyen tiettyyn systeemiin tai prosessiin peräkkäisinä ajanhetkinä. Kun havaintoja saadaan kerättyä oikeista kohteista sopivalla aikavälillä, voidaan ennustejärjestelmän toimivuutta arvioida ja valvoa aikasarjojen datan avulla. Aikasarja-analyysillä pyritään hyödyntämään kerättyä dataa karkeasti eriteltynä kahdella eri tavalla: ensinnäkin sen avulla voidaan ymmärtää ja tulkita syitä ja riippuvaisuuksia tiettyjen tapausten takana, toiseksi sen avulla voidaan ennustaa systeemin tai prosessin tilaa tulevaisuudessa (Avikesh & Prakash 2017, 6–8).

Ennusteista on hyvä pitää mielessä kolme seuraavaa asiaa. Ensinnäkin ennusteet ovat harvoin täydellisiä. Tulevaisuuden ennustamiseen liittyy aina epävarmuuksia ja virheitä, ja näiden takia usein

ei käy kuin on ennustettu. Hyvä ennuste kuitenkin estää tekemästä suuria virheitä, joita voi tapahtua ilman ennusteen tekemistä. Toiseksi ennusteet toimivat usein paremmin ryhmille kuin yksittäisille tapauksille. Kun yksittäiset tapahtumat niputetaan ryhmiksi, niiden yksittäiset arvot supistavat toistensa vaikutuksia. Näin vältetään ongelmalta, jossa yksittäinen tapaus onkin muihin vastaaviin verrattuna erittäin korostunut. Kolmanneksi ennusteet ovat tarkempia lyhyemmälle kuin pidemmälle aikavälille. Mitä lyhyemmälle aikavälille ennuste on tehty, sitä vähemmän siihen liittyy epävarmuutta. (Sanders 2017, 20.)

3.1 Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen ennustaminen

Kvalitatiivisilla ennustuksilla tarkoitetaan ennustuksia, jotka on tehty historiallisen datan puutteessa, ja niiden tekemiseen on käytetty asiantuntemusta ja kokemusta ennustettavaan asiaan liittyen (Montgomery ja muut 2015, 4). Esimerkkinä kvalitatiivisesta ennusteesta voisi olla uuden rakenteilla olevan tuulipuiston sähkön vuosituoton arviointi.

Kvantitatiivisilla ennustuksilla tarkoitetaan ennustuksia, joiden tekemisessä hyödynnetään dataa menneisyydestä tai vastaavista tilanteista, ja datan lisäksi ennusteen tekemiseen käytetään jotain ennustemallia tai -menetelmää. Malli hyödyntää datassa esiintyviä toistuvuuksia ja esittää tilastollisen riippuvuuden muuttujan edellisten ja nykyisten arvojen välillä. Kolme yleisimmin käytettyä mallia ovat regressiomallit, tasoitusmallit ja yleiset aikasarja mallit. (Montgomery ja muut 2015, 5.) Seuraavissa kappaleissa tutustaan hieman näihin kolmeen eri malliin, mutta kaavasijoitukset ja laskutoimitukset jätetään näitä malleja hyödyntäville sovelluksille ja ohjelmille.

3.1.1 Regressiomalli

Regressiomenetelmät hyödyntävät mitattavan muuttujan sekä yhden tai useamman muuttuajaan liittyvän tekijän suhdetta toisiinsa. Tätä menetelmää kutsutaan usein myös kausaaliseksi ennustemalliksi, sillä ennusteet perustuvat syy-seuraussuhteeseen. (Montgomery ja muut 2015, 5 & 107.) Esimerkiksi vesivoimalla tuotettavan sähkön määrän ennustaminen viime päivien sademäärän perusteella on regressiomallia hyödyntämällä tehty ennuste.

Yksinkertainen lineaarinen regressiomalli sisältää vain yhden ennustetekijän, ja se voidaan kirjoittaa kaavan 3 muotoon:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (3)$$

jossa y on tulos, x on ennustustekijä, β_0 ja β_1 ovat regressiokertoimia, ja ε on virhetermi. β_0 ja β_1 ovat vastaavasti tulkintoja suoran kulmakertoimesta ja y -akselin leikkauspisteestä. Nämä parametrit ovat yleensä tuntemattomia ja ne täytyy arvioida datan perusteella. Myös virhetermi on arvioitava datan perusteella. (Montgomery ja muut 2015, 107.)

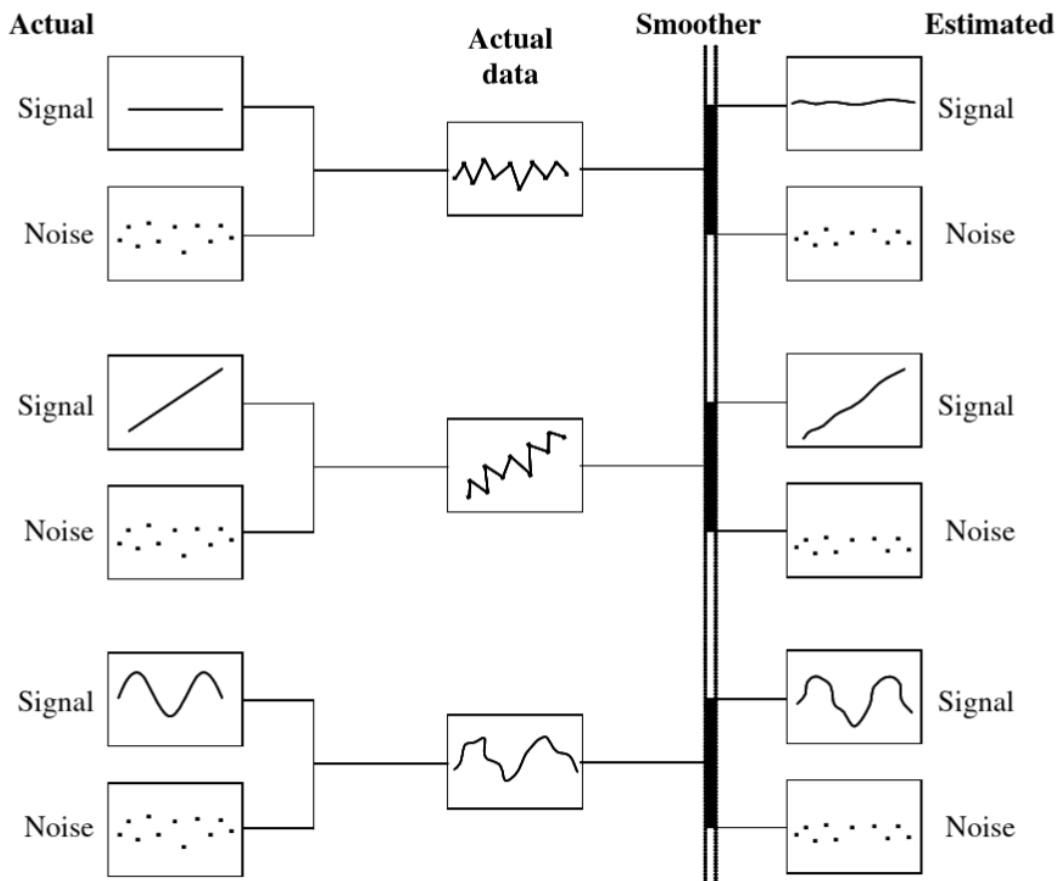
Usein ennusteita ei haluta perustaa vain yhteen ennustetekijään, vaan huomioon halutaan ottaa useampi tekijä. Jos mallissa käytetään k :n verran tekijöitä, yhtälö voidaan kirjoittaa kaavan 4 muotoon:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (4)$$

jossa $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ termejä kutsutaan usein osittaisiksi regressiokertoimiksi koska niillä johdetaan vaikutusta tuloon y ennustekijöiden x_1, x_2, \dots, x_k avulla. (Montgomery ja muut 2015, 108.)

3.1.2 Tasoitusmalli

Kerätyn datan voidaan ajatella muodostuvan kahdesta toisistaan eroavasta komponentista: signaalista ja häiriöstä. Signaali edustaa kerätyn datan toistuvuutta, ja häiriö taas on poikkeamat kerätyssä datassa. Menetelmää, jolla pyritään erottamaan datasta signaali ja häiriö kutsutaan tasoittamiseksi (smoothing). Tasoittamisella ei päästä täydelliseen signaalin ja häiriön erottamiseen, mutta lopputuloksena on usein hyvä arvio. Yleisimmin käytetyt tasoitusmallit ovat keskiarvollisia, eli jokin yksittäinen havainto korvataan tietyn ajan havaintojen keskiarvolla. (Montgomery ja muut 2015, 233–234.) Kuviossa 5 on havainnollistettu tasoitusmenetelmien käyttöä datassa olevan signaalin ja häiriön arvioimiseen.



Kuvio 5. Datan arvojen tasoittamisen prosessi. (Montgomery ja muut 2015, 234.)

3.1.3 Yleiset aikasarjamallit

Tasointumenetelmät perustuvat olettamukseen, että aikasarjan datan voidaan olettaa koostuvan kahden toisistaan poikkeavan asian summasta: lainalaista signaalista ja stokastisesta, eli satunnaisesta, häiriöstä. Menetelmässä oletetaan, että häiriöt ovat yksittäisiä shokkeja tai tapauksia prosessissa, käytännössä kuitenkin näin ei ole, vaan yksittäinen häiriö voi vaikuttaa useaan havaintoon aineistossa. Tämä pyritään ottamaan huomioon yleisissä aikasarjamalleissa. Näitä aikasarjamalleja kutsutaan usein ARIMA-malleiksi (Autoregressive integrated moving average model). (Montgomery ja muut 2015, 327–329.)

3.2 Ennustaminen prosessina

Toisiinsa kytkeytyneiden tapahtumien tai toimintojen sarjaa, jonka tuloksena yksi tai useampi syöte muuntuu yhdeksi tai useammaksi tulokseksi kutsutaan prosessiksi. Lähes kaikki työ tehdään

prosesseissa, myöskään ennustaminen ei ole poikkeus tästä. Ennustamisen prosessi koostuu seuraavista osista: ongelman määrittely, datan kerääminen, datan analysointi, mallin valinta ja sovit-taminen, mallin validointi, ennustemallin käyttöönotto, ja lopulta ennustemallin toiminnan valvo-minen. (Montgomery ja muut 2015, 13.) Prosessi on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Ennustamisen prosessi. (Mukaillen Montgomery ja muut 2015, 14.)

Montgomeryn ja muiden (2015, 13) mukaan ongelman määrittämisessä tärkeänä osana on selvittää, kuinka ennustetta tullaan käyttämään, ja mitä ennustaja tulee saamaan ennusteesta. Oleellista on selvittää ennustuksen teon tiheys, kuinka pitkälle ennusteen on jatkuttava, ja millaista tarkkuutta ennusteelta odotetaan.

Montgomeryn ja muiden (2015, 14) mukaan datan keräämiseen liittyy aiheelle relevantin datan kerääminen historiasta, erityisen tärkeää on kerätä pelkästään aiheeseen liittyvää eli relevanttia dataa, sillä data pitää myös säilyttää jollain tavalla. Sandersin (2017, 21) mukaan myös kerättävään aikaväliin ja kerätyn datan yksikköön tulee tässä vaiheessa kiinnittää huomiota. Esimerkiksi jonkin teollisuuden prosessin tunnin keskitehoksi voitaisiin mitata taulukon 1 mukaista dataa.

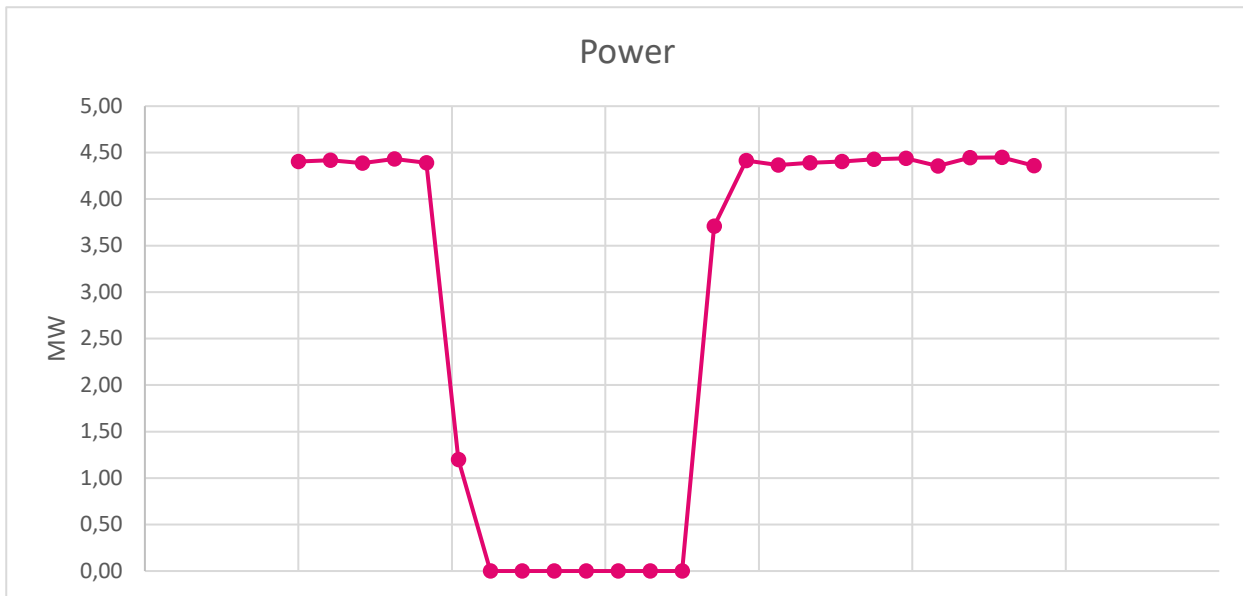
Taulukko 1. Kuvitteellisen tuotantoyksikön keskiteho

Date	Power [MW]
2.5.2021 0:00	4,40
2.5.2021 1:00	4,42
2.5.2021 2:00	4,39
2.5.2021 3:00	4,43
2.5.2021 4:00	4,39
2.5.2021 5:00	1,20
2.5.2021 6:00	0,00
2.5.2021 7:00	0,00
2.5.2021 8:00	0,00
2.5.2021 9:00	0,00
2.5.2021 10:00	0,00
2.5.2021 11:00	0,00
2.5.2021 12:00	0,00
2.5.2021 13:00	3,71
2.5.2021 14:00	4,41
2.5.2021 15:00	4,37
2.5.2021 16:00	4,39
2.5.2021 17:00	4,41
2.5.2021 18:00	4,43
2.5.2021 19:00	4,44
2.5.2021 20:00	4,35
2.5.2021 21:00	4,45
2.5.2021 22:00	4,45
2.5.2021 23:00	4,36

Taulukosta näkee hyvin taulukkomuodossakin, että tyypillisesti tunnin keskiteho on noin 4,4 MW:n luokkaa, ja todennäköisesti aamuviiden aikaan on tullut jokin häiriö tai tuotannon keskeytys, ja yhden jälkeen on palattu takaisin normaaliin. Huomioitavaa on, että sähkötehoa ei yleensä mitata tehon yksiköissä eli wateissa, vaan mittarit mittaavat ns. kumulatiivisesti energiaa, josta johdetaan teho, jota taulukossa on esitetty.

Datan analysoinnissa kannattaa niin Montgomeryn ja muiden (2015, 15) kuin Sandersinkin (2017, 22) mukaan käyttää apuna kaavioita ja kuvaajia, näin datasta voi helpommin analysoida esimerkiksi kausittaisia vaihteluita. Joskus tässä vaiheessa kannattaa jo hyödyntää datan tasoitusmene-

telmiä. Poikkeamia datassa kannattaa tutkia tarkemmin. Tämän vaiheen tarkoituksena on kartoittaa millainen kvantitatiivisen ennustamisen malli kohteelle sopisi. Kuviossa 7 on muunnettu kuvaajaksi taulukon 1 data.



Kuvio 7. Kuvitteellisen tuotantoyksikön keskitehokuvaaja

Mallin valinta ja sovittaminen koostuu yhden tai useamman ennustemallin valinnasta, ja mallissa käytettävien parametrien arvioimisesta. Mallin validoinnissa arvioidaan kuinka hyvin valittu malli toimisi sille valitussa yhteydessä. Käyttöön otossa malli ja sen perusteella saatu ennuste otetaan käyttöön, tässä vaiheessa on oleellista, että mallin käyttäjä ymmärtää kuinka mallia tulee käyttää, ja kuinka usein ennusteita tulisi tehdä. (Montgomery ja muut 2015, 15.) Sandersin (2017, 25) mukaan viimeinen vaihe on valvoa ennusteen tarkkuutta, ja mitata ennustevirhettä. Mallia on joko vaihdettava kokonaan tai siihen on tehtävä muutoksia, mikäli haluttua tarkkuutta ei saavuteta.

4 Sään ennustaminen ja tuulituotanto

Sääennusteita tarvitsevat useat eri tahot kuten pelastusviranomaiset, lentoliikenne, muu liikennesektori, maatalous, matkailu, energia, tapahtumajärjestäjät ja kansalaiset. Tässä luvussa tutustutaan hieman sään ennustamisen menetelmiin ja eri vuodenaikojen tuomiin haasteisiin sään ennustamisessa. Sään ennustaminen on yksi sähkömarkkinoiden kulmakivistä jo yleisestikin.

Sähkönkulutus vaihtelee voimakkaasti sään mukaan: lämpimillä keleillä rakennusten jäähdytysjärjestelmät vaativat energiaa ja tietyt kemianteollisuuden prosessit vaativat enemmän energiaa. Rakennusten lämmitys taas ei lämpimillä keleillä vaadi juurikaan muuta energiaa kuin ympäristöstä saatavaa, vastaavasti kylmillä keleillä sähköä kuluu lämmitykseen enemmän. Tuulivoiman tuotannon näkökulmasta sääilmiöistä merkittävin on tuulen nopeus, mutta myös ilman lämpötilalla, pilvisyydellä, sateella ja tuulen suunnalla on merkitys.

Säähän liittyy vahvasti kaksi toisistaan poikkeavaa käsitettä: sää ja ilmasto. Sää on paikallinen ja hetkellinen ilmiö, se kuvaa ilmakehän tilaa jossakin tietyssä paikassa tiettyyn aikaan. Ilmasto taas on sään vaihtelua ja muutosta pitkän ajan kuluessa. Sään voi nähdä ikkunasta, mutta ilmastoa ei.

Sään ja ilmaston ennustaminen voidaan Tenhusen (2020) mukaan jakaa karkeasti kolmeen eri kategoriaan. Ensimmäinen kategoria on ilmastoennusteet, joilla arvioidaan esimerkiksi ilmastomuutosta, tällainen ennuste voi ulottua esimerkiksi vuosisadan loppuun. Toinen kategoria on vuodenaikaisennusteet, jollainen on esimerkiksi suuntaa antava arvio tulevan kuun säästä. Tämän kategorian ennusteen tuloksen ovat yleensä keskiarvoja koko kuulle, ja ennusteet eivät ole päiväkohtaisia. Viimeinen kategoria on niin sanottu normaali sääennuste, joka tehdään lyhyelle ajalle tulevaisuuteen. Mitä pienempi ja lyhytikäisempi ennustettava ilmiö on, sitä lyhyemmän ajan tulevaisuuteen sen voi ennustaa. Sääilmiöistä sade- ja ukkoskuuroja voi ennustaa 0–2 vuorokauden päähän, tuulta 2–3 vuorokauden, matalapaineiden reittejä 3–5 vuorokauden, lämpötilaa 4–7 vuorokauden, ja lopuksi säätyyppiä 6–10 vuorokauden päähän. (Tenhunen 2020.)

4.1 Sään ennustaminen yleisesti

Säätä ennustetaan aloittamalla ilmakehän analysoimisella. Ensin selvitetään matala- ja korkeapaineiden, kylmän ja lämpimän sekä kostean ja kuivan ilman sijainnit. Seuraavaksi selvitetään minne erilaiset ilmamassat ovat liikkumassa, sekä missä sadealueet sijaitsevat ja miten liikkuvat. Huomioitavaa on, että pienellekin alueelle, kuten esimerkiksi maakuntaan, tehty ennuste vaatii koko maapallon ilmakehän kehityksen ennustamista. (Tenhunen 2020.)

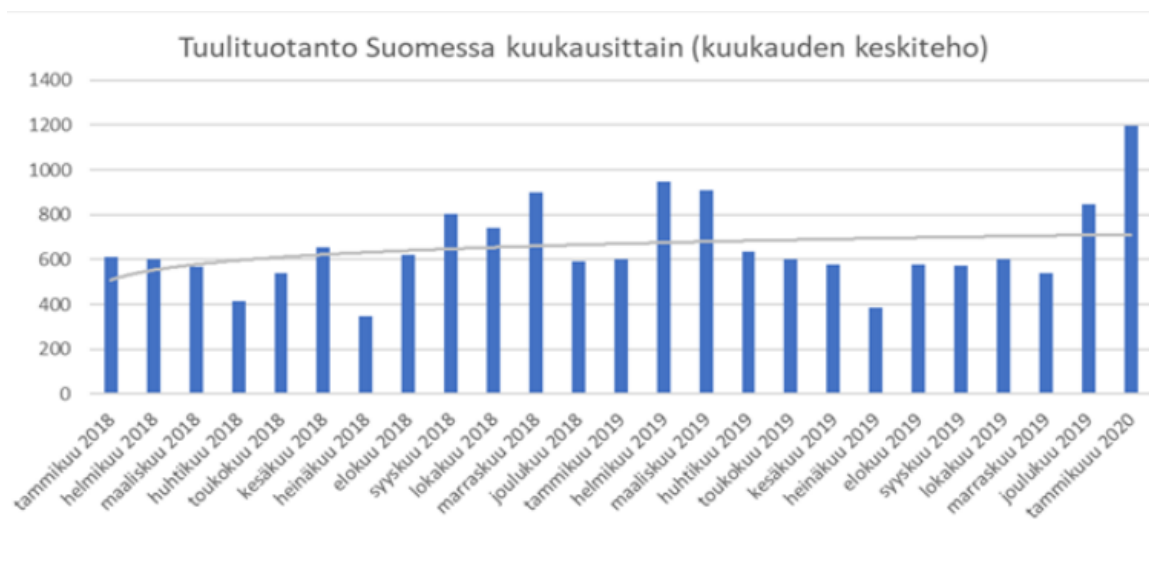
Tenhusen (2020) mukaan meteorologi ennustaa säätä käyttäen apunaan säähavaintoja ja sääennustemallien tuottamia ennusteita. Sääennustemallin pohjaksi on saatava tieto alkutilanteesta, ja

tätä tilannetta käyttäen säämalli laskee ilmakehän tilaa tulevaisuuteen. Säämalli voi olla yhdistelmä erilaisia malleja, ja Tenhusen (2020) mukaan meteorologin onkin hyödynnettävä omaa teoreettista sekä käytännön osaamistaan sään käyttämisestä, jotta tuloksena olisi hyvä ennuste. Aivan lähitunneiksi voidaan ennuste tehdä pelkkien havaintojen perusteella, mutta tätä pidempiin sääennusteisiin tarvitaan sääennustusmalleja.

Sääennusteet eroavat hyvin usein toisistaan, ja tämä johtuu siitä, että vaikka ennusteiden pohjana olevat havainnot ja apuvälineet ovat hyvinkin samanlaiset, ennusteen tekijöillä on usein eri näkemys tulevasta, ja käytettävät säämallit eroavat. Tenhusen (2020) mukaan ennusteita käyttäessään onkin tärkeä muistaa, että muutaman vuorokauden päähän ulottuvan ennusteen paikkansapitävyys on yleensä 80–90 % prosentin luokkaa, 2–5 vuorokauden sääennusteen 70–80 %, ja tätä pidempien ennusteiden paikkansapitävyys vaihtelee suuresti, ja ei näin ole enää kovin luotettavaa.

4.2 Eri vuodenaikojen tuomat haasteet tuulien ennustamiseen

Suomessa on neljä toisistaan poikkeavaa vuodenaikaa. Tuulisuus vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan, painottuen vahvasti talveen. Kuviossa 8 on eritelty megawateissa suomalaisen tuulituotannon keskiteho.



Kuvio 8. Tuulituotanto Suomessa kuukausittain. (Selvitystyö Suomen tuulivoimasta 2020, 9)

Kuviosta 8 näkee että eniten tuulituotantoa on talvikuukausina, ja taas kesäkuukausina tuotanto on keskimäärin matalampaa kuin talvisin. Tuuliin liittyy eri vuodenaikoina erilaisia haasteita, jotka on syytä huomioida tuotantoennusteita tehdessä.

Kaikkia vuodenaikoja yhdistävä tekijä on Tenhusen (2020) mukaan lämpimän ja kylmän rintaman aiheuttamat ilmiöt. Lämpimälle rintamalle on tyypillistä runsas pilvisuus, tasainen ja pitkäkestoinen sade sekä tuulen kääntyminen rintaman jälkipuolella. Kylmälle rintamalle puolestaan tyypillistä on voimakkaat puuskaiset tuulet, sateiden lyhytkestoisuus ja kuuroluonteisuus, tuulen voimistuminen rintaman jälkipuolella, sekä nopea selkeneminen rintaman jälkeen.

4.2.1 Talven sää

Talvi on tärkeää aikaa tuulituotantoennusteiden kannalta, sillä se on tyypillisesti ajankohta, jolloin tuulee eniten. Merkittävin ero muihin vuodenaikoihin on auringonsäteilyn vähäisyys, josta Tenhusen (2020) mukaan aiheutuu kaksi ilmiötä: ensinnäkin auringon lämmön aiheuttamaa nousuliikettä ei esiinny paikallisesti, joten pilvisyyttä hallitsee laajemman mittakaavan nousuliike. Toiseksi ilmakehän kosteussisältö pienenee ilman jäähtyessä, joten pilvet yleensä satavat alas.

Talvella esiintyy myös jäätämistä, ilmiötä, jossa joko jäätävät sateet tai matalalla oleva pilvi aiheuttavat jään kertymistä tuulivoimalan lapoihin, heikentäen tuulivoimalan lapojen aerodynamiikkaa. Tästä johtuen tuulesta ei saada irti kaikkea siitä mahdollisesti saatavaa tehoa, joka puolestaan aiheuttaa tuotantotappioita. Jää voi myös yllättäen irrota aiheuttaen tapaturmavaaran, ja sen kertyminen voi myös heikentää voimalan rakenteita ja aiheuttaa ennenaikaista kulumista. (Jäätämisaatlas n.d.).

Tuulien ennustettavuus on keskimäärin talvisin hyvä, ja säämallit osaavatkin kuvata tilanteita hyvin. Haasteina ovat talvimyrskyt, niiden ajoitus ja voimakkuus ovat vaikeasti ennustettavia. Kovien pakkasten aikaan tuulet ovat usein heikkoja, ja kun tuuli puhalttaa pohjoisesta, on todennäköistä, että tuuli on puuskaista. (Tenhunen 2020).

4.2.2 Kevään sää

Keväällä auringon säteilylämmitys kasvaa, ja sen aiheuttama nousuliike kasvaa myös. Tämä yhdistettynä alhaiseen ilman kosteussisältöön tarkoittaa vähäistä pilvisyyttä ja runsasta auringonpistettä. Auringon lisääntyvästä säteilylämmityksestä johtuen myös lämpötilaerot pohjoisnavan ja päiväntasaajan välillä pienenee, joka heikentää suihkuvirtauksia, joka puolestaan heikentää matalapaineita, ja tästä johtuen suuremman mittakaavan nousuliike vähenee. Tuulisuus heikkenee verrattuna talveen, matalapainemyrskyjä esiintyy harvemmin, joten myrskytuuliakin esiintyy vähemmän. Tuuli on keväisin tyypillisesti luonteeltaan puuskaista. (Tenhunen 2020.)

4.2.3 Kesän sää

Kesällä auringonsäteily lämmittää voimakkaasti aiheuttaen paikallista konvektiota, eli pystyvirtausta, jossa maanpinnalla oleva ilma nousee ylös joistain kohdista ja painuu toisaalla alas. Pystyvirtauksen osuessa kohdalle tuulivoimalan tuotto putoaa lähes nolnaan. Sade- ja ukkoskuurot ovat myös yleisiä. Suuremmassa mittaluokassa lämpötilaero navan ja päiväntasaajan välillä on pienimmillään, josta johtuen suihkuvirtaus on heikoimmillaan, ja matalapainetoiminta hitaimmillaan. Tyypillisesti kesäisin tuuli tyyntyy yöksi ja illaksi. (Tenhunen 2020).

Runsaat sade- ja ukkoskuurot aiheuttavat haasteita tuulten ennustamiselle kesäisin. Kuuropilvet aiheuttavatkin erilaisia ilmiöitä, joilla kaikilla on vaikutusta tuulten ennusteisiin: ensinnäkin tuuli on kuurojen yhteydessä puuskaista, toiseksi lämpötilat tyypillisesti tipahtavat nopeasti kuuron osuessa kohdalle. Sade ja ukkoskuurot ovat myös hyvin paikallisia ilmiöitä, joten piste-ennusteet ovat usein hyvinkin epätarkkoja.

4.2.4 Syksyn sää

Syksyisin auringon säteilylämmitys alkaa heikentyä, ja lämmityksen aiheuttama nousuliike vähenee. Lämpötilaerot suuressa mittakaavassa alkavat kasvaa, aiheuttaen suihkuvirtausten voimistumista. Matalapainetoiminta kiihtyy, jonka seurauksena syysmyrskyt ovat yleisiä. Syysmyrskyjen reitti, voimakkuus ja suunta ovat vaikeasti ennustettavia. Ilmakehässä on syksyisin runsaasti kosteutta ja lämpöä, josta aiheutuu sumuja ja sumupilviä. Sumu taas hankaloittaa ennustamista, sillä niiden syntymistä on vaikea ennustaa, lämpötilaennusteet vaihtelevat sumun takia suurestikin, ja

tuuli on sumussa tyypillisesti heikkoa. Mikäli sumua tai sumupilviä ei synnykään, voi tuuli olla reilusti voimakkaampaa kuin on ennustettu, ja päinvastoin. (Tenhunen 2020).

5 Tuulivoima sähkömarkkinoilla

Sähkömarkkinat yksinkertaistettuna toimivat siten, että sähköntuottajat myyvät, ja ostajina toimivat suuret teollisuuskäyttäjät sekä vähittäismyyjät. Vähittäismyyjät myyvät ostamansa sähkön edelleen kuluttajille. Suurin osa sähkön pörssikaupasta käydään Spot-markkinoilla, siellä seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille lyödään hinnat ja määrät lukkoon.

Sähkön kulutus ja tuotanto ei aina tapahdu kuten edellisenä päivänä on suunniteltu. Esimerkiksi sääolot, kuten lämpötilat ja tuulisuus vaihtelevat, ja voimalaitoksiin sekä teollisuuden prosesseihin voi tulla häiriöitä. Tilanteen muuttuessa sähköä voi tarpeen mukaan ostaa tai myydä päivänsisäisillä markkinoilla. Yleensä näillä päivänsisäisillä markkinoilla hinta ei ole sama kuin spot-markkinoilla. Kun kysyntä nousee, sähkönhinta niin päivänsisäisillä kuin spot-markkinoillakin nousee, sillä sen tuottamiseen tarvitaan kalliimpia menetelmiä. Vastaavasti hinta laskee kysynnän ollessa pienempää. Esimerkiksi kun pohjoismaissa on hyvä vesitilanne, eli joissa ja järvissä on paljon vettä, on sähkökin halvempaa, sillä vesivoimalla tuotettu sähkö on halpaa verrattuna polttomenetelmillä tuotettuun sähköön.

Vain harvoin kulutus- tai tuotantoennusteen perusteella tehty spot-kauppa, tai päivänsisäisilläkään markkinoilla tehdyt kaupat menevät yksiin todellisen toteutuneen kulutuksen tai tuotannon kanssa. Taseselvityksessä lasketaan ennustevirhe jälkepäin. Liiasta käytetystä sähköstä maksetaan säätösähkömarkkinoilla määräytynyttä hintaa, johon tulee lisäksi vielä tasesähkön selvitysmaksu. Vastaavasti mikäli sähköä kuluttaa vähemmän kuin mitä on ostanut, on käyttämätön sähkö myytävä tasesähkönä, tähänkin tulee lisäksi selvitysmaksu. Tasesähkön hinnat ovat yleensä kustannuksiltaan suurempia kuin jos kulutus olisi toteutunut juuri ennusteen mukaisena, tämä ohjaa automaattisesti parempien ennusteiden tekemiseen, ja kun tuotanto ja kulutus pysyvät paremmin tasapainossa, myös sähköjärjestelmän ylläpidon kulut pysyvät pienempinä.

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla tasevastuu on Energia-alan sääntelyviranomaisten yhteistyöviraston (The European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, ACER) määrittele-

mänä jokaisen maan kantaverkkoyhtiö. Suomessa kantaverkkoyhtiönä toimii Fingrid. Tasevastavan tehtävänä on kehittää sähkömarkkinoita, minimoida markkinoiden toimivuutta haittaavat sähkönsiirron pullonkaulat maiden välillä ja maan sisällä, antaa mahdollisimman paljon siirtokapasiteettia sähkömarkkinoiden käyttöön sekä jakaa tietoa markkinoista ja pitää niiden toiminta mahdollisimman läpinäkyvänä. Yhtenä tehtävistään Fingrid myös ylläpitää säätösähkömarkkinoita, joiden avulla tuotanto ja kulutus Suomessa pidetään tasapainossa.

Sähkökauppaa käydään myös pidemmälle tulevaisuuteen kuin vain seuraavaan päivään. Sähkön johdannaismarkkinoilla eri markkinatoimijat tuottajista käyttäjiin ja myyjiin toteuttavat riskinhallintaa suojautumalla sähkön hinnanvaihteluja vastaan futuureilla ja optioilla. Sopimukset voivat olla kahdenkeskisiä, tai johdannaistuotteita voi etsiä eri pörseistä. Johdannaissopimukseen ei sisälly fyysistä sähkön toimitusta. (Johdanto sähkömarkkinoihin 2020.)

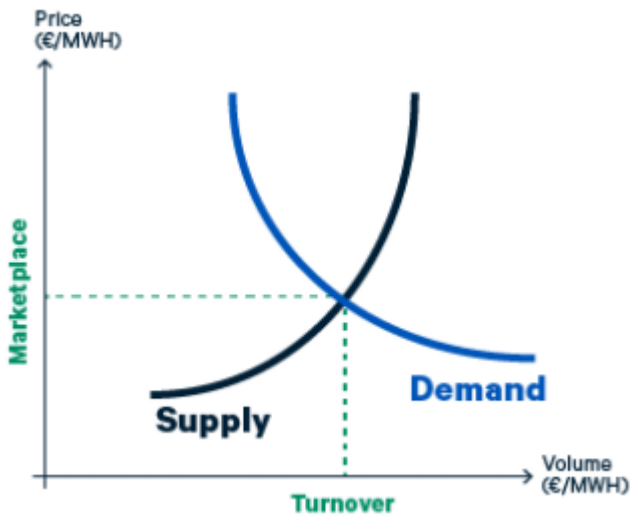
Myös fyysisestä toimituksesta kiinteään hintaan voidaan sopia ennen toimitushetkeä. Näitä sopimuksia voidaan tehdä jopa kymmenen vuoden päähän, mutta harva toimija varautuu markkinoilla niin pitkän ajan päähän. Useamman vuoden päähän tehtävät sopimukset ovat kuitenkin melko yleisiä.

Tuulisähkön lisääntyminen markkinoilla on aiheuttanut uusiutuvaa energiaa koskevien PPA-sopimusten (Power Purchase Agreement) voimakkaan kasvun maailmanlaajuisesti. Tuulivoimaa koskeva PPA-sopimus on pitkäaikainen sopimus tuulituottajan ja joko yksittäisen, yleensä suuremman kokoluokan, tai joukko pienempiä kuluttajia ostaa tuulituottajan tuotannon tai osan siitä. Tuotannosta sovitaan hinta, ja tuotettu sähkö ostetaan tuolla hinnalla riippumatta muun markkinan hinnasta seuraavan 10–20 vuoden ajalta. Sopimukset voivat olla tyypiltään myös synteettisiä, jolloin tuottaja myy tuotetun sähkön markkinoille, ja ostaja ostaa sähkönsä normaaliin tapaan markkinoilta. Jälkikäteen selvitetään osapuolien maksettavaksi tuleva hinta PPA-sopimuksessa sovitun hinnan ja sähkön toteutuneen markkinahinnan välisenä erotuksena. (Power purchase agreements 2019).

5.1 Day-ahead markkinat

Sähkön ostajat ja myyjät jättävät päivittäin klo 13 mennessä seuraavaa vuorokautta koskevat tarjouksensa jompaankumpaan Suomessa toimivaan sähköpörssiin, Nord pooliin tai Epexspottiin.

Sähkön hinta seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille lasketaan sähkön kysyntä ja tarjonta käyrien leikkauspisteestä, huomioiden hinta-alueiden välisten siirtoyhteyksien kapasiteetit. Kuviossa 9 on havainnollistettu prosessia.



Kuvio 9. Tuntihinnan muodostuminen Day-ahead markkinalla. (Day-ahead market 2021.)

Seuraavan vuorokauden hinnat ja toteutuneet kaupat julkaistaan kello kahteen mennessä. Jokainen sähkön ostaja ja myyjä on velvoitettu kuluttamaan tai toimittamaan ostamansa tai myymänsä sähkön.


5.2 Intraday markkinat

Intraday eli päivänsisäinen markkina toimii day-ahead markkinan rinnalla auttamassa tasoittamaan sähkön myyjän ja ostajan sähkötasetta. Kauppaa intraday markkinalla voidaan käydä Suomessa aina sähkön toimitustunnin alkuun saakka. Markkinalla ei ole määritetty tiettyä kiinteää hintaa toimitustunnin sähkölle, vaan kauppa toteutetaan korkeimman ostohinnan ja alhaisimman myyntihinnan perusteella.

Intraday markkinat ovat tärkeä markkina jokaiselle tuottajalle tai kuluttajalle. Sähkötuotannossa voi tulla häiriöitä, ja samoin kulutuksessa. Sähköä on voitu siis ostaa tai myydä day-ahead markkinoilla enemmän tai vähemmän kuin olisi tarpeen, ja intraday markkinalla vajetta tai ylijäämää voidaan paikata. Näin mahdollisesti säästytään myös reservien aktivoineilta ja ylimääräisiltä kustannuksilta.

5.3 Reservimarkkinat

Reservimarkkinat ovat Pohjoismaissa kantaverkkoyhtiöiden ylläpitämät markkinat, joilla huolehditaan, että sähköä tuotetaan joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Mittarina tasapainosta toimii sähköverkon taajuus, joka optimitilanteessa on tasan 50 Hz. Taajuus saa vaihdella välillä 49,9 ja 50,1 Hz, ja suomalainen kantaverkkoyhtiö Fingrid pitää taajuuden sallituissa rajoissa aktivoimalla säätötarjouksia ylläpitämiltään säätösähkö markkinoiltaan, ja varaamalla reserviä. Kuviossa 10 on esiteltyä Suomessa toimivat eri reservimarkkinat.

	FFR	ED	FCR-N	FRR	mFRR
	Nopea taajuus-reservi, Suomi 18 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi 300 MW, Pohjoismaissa 1 450 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi 123 MW, Pohjoismaissa 600 MW	Automaattinen taajuudenhallinta-reservi, Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoittava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuus-poikkeamissa, käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuus-poikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Kolmessa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa
					

Kuvio 10. Reservimarkkinat Suomessa. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2021, 5).

Tuulivoiman osallistumista reservimarkkinoille rajoittaa se, että sen tuotantoa ei voi kovin tarkkaan ennustaa. Joskus tuulee, ja toisinaan ei. Säätösähkö, eli m-FRR markkinalle tuulivoima voi kuitenkin osallistua, mutta esimerkiksi vuonna 2019 vain 2,3 % asennetusta tuulivoimakapasiteetista osallistui (Sonkeri 2021, 7.)

M-FRR eli säätösähkömarkkinoilla aktivoidut tarjoukset määräävät taseselvityksessä käytettävän sähkön hinnan. Mikäli säätöjä ei ole toteutettu jollain tunnilla, määräytyy taseselvityksessä käytettävä hinta suoraan day-ahead markkinalta.

6 Pohdinta ja tulokset

Uusiutuvilla tuotantomuodoilla kuten tuulella ja auringolla tuotettua sähköä tulee suurella nopeudella lisää Pohjoismaisille sähkömarkkinoille aiheuttaen haasteita niin sähköverkon tasapainossapidolle kantaverkkoyhtiöille, kuin tuulipuistojen tasevastaaville. Tuulivoiman ja sen tuotannon käyttäytyminen ei ole täydellisesti ennustettavissa, ja sen tuotantoa ei saada ajoitettua siihen hetkeen, kun kulutusta tarvittaisiin eniten. Sähkön kulutus ja tuotantotottumusten on muututtava: enää ei voida mennä kuluttajan ehdoilla tuotannon mukautuessa sen tarpeisiin, vaan kulutuksen on tulevaisuudessa mukauduttava tuotantoon. Perinteisistä sähköntuotantomuodoista ei tietenkään voi kokonaan luopua, ja Suomen kylmissä olosuhteissa on vain eduksi, että CHP-laitoksissa tuotetaan lämmön lisäksi sähköä. Peruskuormaa tuottavat ydinvoima ja vesivoima ovat myös hyvin tärkeitä sähkön riittävyden kannalta. Vesivoima on vieläpä hyvä tuotantomuoto siinä, että sillä on hyvä säätää verkon taajuutta poikkeusoloissa.

Tuulivoima on lisääntymässä markkinoilla suuresti, ja tasevastaavien on syytä kehittää keinojaan omassa taseessaan olevan tuulituotannon mahdollisimman tarkkaan ennustamiseen. Opinnäytetyössä tutustuttiinkin ennustamisen perusteisiin: data-analytiikkaan ja erilaisiin ennustemalleihin, sään ennustamisen perusteisiin ja eri vuodenaikojen tuomiin haasteisiin ennusteissa. Lisäksi tutustuttiin myös sähkömarkkinoiden toimintaan ja erilaisiin markkina-alustoihin, joita varten ennusteita tehdään.

Vaikka tuulivoimaa Suomen sähkömarkkinoilla onkin tällä hetkellä vain noin 10 % kokonaissähköhankinnasta, on tuulivoima usein yhtenä syynä erityisen suuriin tai poikkeuksellisen pieniin säätosähkön ja siitä johtuviin tasesähkön hintoihin. Jos tuulituotanto poikkeaa suuresti day-ahead markkinalle ennustetusta tuotannostaan, kantaverkkoyhtiö joutuu aktivoimaan säätötarjouksia ja hyödyntämään reservejä voimajärjestelmän tasapainossapidossaan. Korkeat tai matalat tasesähkön hinnat ovat suuri taloudellinen riski tasevastaaville, ja tuulivoiman lisääntyessä markkinalla riskin suuruus kasvaa.

Opinnäytetyössä ei perehdytty erilaisiin ennusteenteko sovelluksiin ja välineisiin, jatkojalustusideana mielestäni olisikin hyvä perehtyä enemmän erilaisiin tarjolla oleviin sovelluksiin, kiinnittäen erityisesti huomiota sovelluksiin jotka hyödyntävät ennusteissaan koneoppimista.

6.1 Ennustaminen day-ahead markkinoilla

Day-ahead markkinalle tuulituotannon myyntiennusteita tehdessä pitää ennusteen ulottua jopa 35 tunnin päähän, eli kello 13:00 on jätettävä seuraavan vuorokauden tarjous markkinalle. Tuulen voimakkuus on ennustettavissa hyvällä todennäköisyydellä 2–3 vuorokauden päähän, mutta sadekuurot ja ukkoset ovat huonosti ennustettavissa noin pitkälle ajalle. Tämä on syytä huomioida erityisesti kesällä ja lämpiminä aikoina syksyisin ja keväisin, kun kuuroja esiintyy eniten. Myös pystyvirtaukset ovat erityisesti kesäisin ja aurinkoisina päivinä yleisiä. Tässä korostuukin se, että on hyvä ottaa ennustamiseen kvantitatiivisen, numeroihin perustuvan ennusteen lisäksi mukaan myös kvalitatiivinen ammattitaitoon ja tietämykseen perustuva ennustaminen. Piste-ennusteisiin, eli tiettyyn pienelle alueelle perustuvaan tuuliennusteeseen ei myöskään kannata luottaa, vaan tuuliennusteita on hyvä ottaa laajemmalta alueelta tuulipuiston ympäriltä. Eri vuodenaikojen tuomat haasteet on hyvä pitää mielessä.

Myös tuotannon suunnitellut katkot, kuten huoltoseisokit on syytä huomioida ennusteita tehdessä. Toimiva ja riittävän tiheä kommunikaatio tuulipuiston tasevastaavan/ennustajan ja tuulipuiston toiminnasta vastaavan tahon välillä on äärimmäisen tärkeää, jottei ennusteta tuotantoa ajankohdalle, jolloin suurin osa voimaloista on pysäytettyinä huollon ajaksi, tai vastaavasti tuoteta sähköä, kun tuotantoa ei ole myyty markkinalle.

Erittäin tärkeää day-ahead markkinalle myytävää tuotantoa ennustettaessa on myös ennustettava usein, ja tuoreella tiedolla. Sää- ja tuuliennusteiden on siis hyvä olla mahdollisimman tuoreita ennusteita tehdessä, ja näitä ennusteita on hyvä ottaa tuulipuistoa ympäröivältä alueelta, eikä pelkästään piste-ennusteena suoraan puiston kohdalta. Puiston tuotanto kannattaa myös ennustaa kokonaisuutena, eikä ennustaa yhtä voimalaa kerrallaan, näin välttyään yksittäisten voimaloiden toimintahäiriöiden suuremmalta vaikutukselta. Olisi hyvä kuitenkin pystyä poistamaan ennusteista yksittäisiä tuulivoimaloita vastaava teho, mikäli tietoon tulee esimerkiksi yhden tai useamman voimalan huoltoseisokki. Day-ahead markkinalle myytävä tuotanto olisi hyvä ennustaa viimeistä kertaa vähän ennen markkinan sulkeutumista kello 13:00, ja ennustetta olisi hyvä arvioida kvalitatiivisesti.

Ennustemallin toimivuutta on myös tärkeä valvoa, ja mahdollisesti vaihtaa tai päivittää tarpeeksi usein, mikäli haluttua ennustetarkkuutta ei saavuteta. Hyvä apukeino tässä olisi datan säilytyksen

ja ennustusohjelman salliessa ennustaa tuulipuistojen tuotantoa useammalla mallilla jatkuvasti, ja kerätä näin dataa monella eri mallilla tuotetuista ennusteista. Ennusteiden osuvuutta olisi helppo vertailla ja tarvittaessa ottaa käyttöön jokin muu kuin käytössä oleva malli.

6.2 Ennustaminen intraday markkinoilla

Sääennusteet ovat jo erittäin luotettavia intraday markkinan tarpeisiin, ja näitä onkin hyvä hyödyntää käydessä kauppaa lähitunneille. Tärkeä apuväline tulevia tunteja ennustettaessa on myös reaaliaikamittaukset: jos viimeisen tunnin aikana ei puisto ei ole tuottanut yhtään sähköä, on epätodennäköistä, että tuotanto juurikaan siitä kohoaa, varsinkin jos sääennusteet lupaavat myös tuuletonta keliä.

Myös päivänsisäisiin markkinoihin liittyy vahvasti kommunikaatio tasevastaavan ja tuulipuiston kunnossapidon välillä. Seisokeista ja huolloista on tärkeä kertoa eteenpäin kauppaa käyvälle osapuolelle, jotta mahdollisesti day-ahead markkinalle huollon ajaksi myyty tuotanto saadaan ostettua takaisin.

Päivänsisäistä kauppaa käyvä voi myös hyödyntää muiden Pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden kuten esimerkiksi Energinetin, Statnettin tai Svenska kraftnätnin voimajärjestelmien avointa dataa, jossa on eroteltuna eri tuotantomuodoittain sähkön hetkellinen tuotanto. Dataa on saatavilla myös day-ahead markkinoille myydystä sähköstä tuotantomuodoittain, joten siihen vertaamalla on nähtävillä ovatko tuuliennusteet osuneet oikein. Mikäli esimerkiksi tuulen suunta on luoteesta, ja Etelä-Ruotsin tuulituotanto on paljon day-ahead markkinalle ennustettua pienempää, on todennäköistä, että sama ilmiö esiintyy pian Suomessakin. Kaikissa tapauksissa tätä tapauksissa tätä ei tietenkään voi hyödyntää.

6.3 Tuotantosuunnitelmat Fingridille

Seuraavan vuorokauden tuotantosuunnitelmat on toimitettava tasevastaavan toimesta Fingridille kello 17:30 mennessä, ja suunnitelmien muuttuessa on tasevastaavan toimitettava päivitettyt tiedot viipymättä. Taseselvityksessä käytetyt tuotantosuunnitelmat on oltava toimitettuna Fingridille viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. Tuotantosuunnitelmia ennustettaessa on käy-

tössä reaaliaikamittausten pohjalta päivitettävät tuotantosuunnitelmat: reaaliaikamittauksista saadaan lähes reaaliajassa, kolmen minuutin välein dataa. Näistä mittauksista otetaan tällä hetkellä kolmen viimeisimmän mittaustuloksen keskiarvo, ja tätä lähetetään tuotantosuunnitelmana Fingridille.

6.4 Säätomarkkinoille osallistuminen

Tällä hetkellä Gasumilla ei ole yhtään tuulipuistoa tasevastuullaan, jotka osallistuisivat säätomarkkinoille. Säätomarkkinoille osallistuminen tuulivoiman kohdalla tarkoittaisi, että tuotantoa olisi pystyttävä säätää alaspäin. Ylössäätö ei tuulituotannon tapauksessa ole realistinen vaihtoehto, sillä silloin tuulisissa tilanteissa jouduttaisiin pienentämään tuotantoa ylössäätö-mahdollisuuden ylläpitämiseksi, ja menetetyistä tuotannosta koituisi näin tappiota. Käytännössä alassäätökin on hankala toteuttaa sillä tasevastaavastaavalla olisi oltava mahdollisuus omasta järjestelmästänsä käsin aktivoida tuotannon alassäätö, yleensä tuulipuistoilla ei ole omalla järjestelmällään mahdollisuutta seurata Fingridin pyytämiä säätojen aktivointeja, ja toteuttaa tuotannon leikkausta.

Mikäli kuitenkin säätomarkkinoille tulevaisuudessa osallistutaan, on seuraavan tunnin säätötarjoukset jätettävä 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. Tällä samalla aikamäärällä toimitaan jo tuotantosuunnitelmien toimituksen kohdalla, joten se ei tuottaisi ongelmaa, haasteena olisi enustaa käyttötunnin mahdollisen säätötarjouksen määrä.

Lähteet

Avikesh, P., Prakash, P. 2017. Practical Time Series Analysis. Packt Publishing. Viitattu 14.3.2021. <https://janet.finna.fi>, Knovel.

Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G., Ljung, G. 2016. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Viides painos. John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 14.3.2021. <https://janet.finna.fi>, ProQuest e-Book Central.

Day-ahead market. 2021. Nord Pool. Tietoa Day-ahead markkinasta. Viitattu 16.5.2021. <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/>.

Energiavuosi 2019 Sähkö. 2020. Esitys vuoden 2019 sähkön tuotannosta ja kulutuksesta. Viitattu 20.2.2021. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2019_sahko.html.

Fingrid avoin data. 2021. Fingridin avoimen datan palvelu. Viitattu 7.3.2021. <https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/>.

Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. 2019. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 2019. Viitattu 25.4.2021. <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>.

Johdanto sähkömarkkinoihin. 2021. Fingridin artikkeli sähkömarkkinoista. Viitattu 9.3.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#sahkon-johdannaismarkkinat>.

Jäätämismatlas. N.d.. Suomen tuuliatlas. Ohjesivu jäätämismatlas -karttaliittymään. Viitattu 16.5.2021. <http://www.tuuliatlas.fi/jaatamismatlas>.

Kaidor. 2013. Global circulation of Earth's atmosphere displaying Hadley cell, Ferrell cell and polar cell. Wikimedia commons. Viitattu 21.4.2021. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_Global_Circulation_-_en.svg.

Landberg, L. 2015. Meteorology for Wind Energy : An Introduction. Ensimmäinen painos. John Wiley & Sons, Incorporated. Viitattu 17.4.2021. <https://janet.finna.fi>, ProQuest e-Book Central.

Montgomery, D., Jennings, C. & Kulahci, M. 2015. Introduction to Time Series Analysis and Forecasting. Viides painos. John Wiley & Sons, Incorporated. Viitattu 13.3.2021. <https://janet.finna.fi>, ProQuest e-Book Central.

Power purchase agreements. 2019. Suomen Tuulivoimayhdistys. Materiaalipaketti. Viitattu 9.3.2021. https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/sty_ppa_materiaalipaketti_fin_nal_20180211.pdf.

Renewable energy in the EU in 2018. 2020. Artikkelit EU:n energiankäytöstä vuonna 2018. Viitattu 3.3.2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10335438/8-23012020-AP-EN.pdf/292cf2e5-8870-4525-7ad7-188864ba0c29>.

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 2021. Fingrid. Julkinen esitysmateriaali. Viitattu 16.5.2021. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat2021.pdf>.

Sanders, N. 2017. Forecasting Fundamentals. Ensimmäinen painos. Business Expert Press. Viitattu 28.3.2021. <https://janet.finna.fi>. ProQuest e-Book Central.

Schaffarczyk, A. 2014. Understanding Wind Power Technology. Ensimmäinen painos. John Wiley & Sons, Incorporated. Viitattu 1.2.2021. <https://janet.finna.fi>. ProQuest e-Book Central.

Selvitystyö Suomen tuulivoimasta – visio 2030. 2020. Suomen Tuulivoimayhdistys ry & Gasum Portfolio Services Oy. Viitattu 15.5.2021. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/selvitystyö_2020_julkinen-versio-1.pdf.

Sjöblom, T. 2021. Paljonko Suomen sähkömarkkinoille mahtuu tuulivoimaa 2030 mennessä?. Esitys tuulivoiman tulevaisuuden näkymistä. Viitattu 13.5.2021. <https://wecfinland.fi/wp-content/uploads/2021/04/sjoblom-toni-paljonko-suomen-shkmarkkinalle-mahtuu-tuulivoimaa-2030-meness.pdf>.

Sonkeri, H. 2020. Wind Power Participation in the Finnish Balancing Electricity Market. Diplomityö. Viitattu 7.3.2021. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2020122056363>.

Suomalaisen tuulivoiman historia. 2021. Tuulivoimayhdistys. Viitattu 10.5.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>.

Tasepalvelu. 2021. Fingridin artikkeli tasepalveluista. Viitattu 26.4.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/>.

Tenhunen, S. 2020. Koulutus säästä, siihen liittyvistä ominaispiirteistä ja ilmiöistä, ja sen ennustamisesta. Ilmatieteenlaitos. Koulutus 11.11.2020.

Tuet tuulivoiman rakentamiselle. 2020. Artikkelit tuulivoiman tuista. Viitattu 4.3.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuet_tuulivoiman_rakentamiselle.