

Opinnäytetyö AMK

Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

2025

Aaron Leino

Tuulivoiman vaikutus sähköpörssin vuorokausihintoihin



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

06.06.2025 | 46 sivua

Aaron Leino

Tuulivoiman vaikutus sähköpörssin vuorokausihintoihin

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tuulivoimatuotannon vaikutusta sähköpörssin vuorokausihintoihin Suomessa. Taustalla on tuulivoiman nopea kasvu ja keskeinen asema Suomen ilmastotavoitteissa. Tuulivoiman tuotannon epävakaus ja sen vaikutus markkinahintoihin on ajankohtainen kysymys, sillä tuotannon kasvu vaikuttaa suoraan sähkön tarjontaan ja hintakäyttäytymiseen.

Tutkimuksessa analysoitiin vuoden 2024 tuntikohtaista tuulivoimatuotantoa ja sähköpörssin hintoja SARIMAX-aikasarjamallin avulla. Malli mahdollistaa kausivaihteluiden, trendeihin perustuvien muutosten ja ulkoisten muuttujien vaikutusten huomioimisen. Lisäksi tarkasteltiin syöttötariffien merkitystä tuulivoiman kehitykselle ja niiden vaikutusta sähkömarkkinoihin.

Tulokset osoittavat, että tuulivoimatuotanto alentaa keskimääräisesti vuorokausimarkkinoiden tuntihintoja. Erityisesti korkean ja matalan tuulituotannon päivät liittyvät selvästi markkinahintojen ääriarvoihin. Syöttötariffien vaikutus on yhä havaittavissa, mutta sen merkitys vähenee, kun uutta tuotantoa rakennetaan markkinaehtoisesti ja vanhojen laitosten tukikaudet päättyvät. Tämä vähentää tuotantotukien roolia sähkön hinnanmuodostuksessa tulevaisuudessa. Tutkimus vahvistaa käsitystä siitä, että tuulivoimalla on yhteys sähkömarkkinoiden toimintaan, mutta antaa myös viitteitä siitä, että sen vaikutukset markkinadynamiikkaan ovat merkittäviä ja monitasoisia.

Asiasanat:

Tuulivoima, uusiutuva energia, sähkömarkkinat, spot-hinta, sähköpörssi

Sisältö

1 Johdanto	6
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	6
1.2 Työn rakenne	7
2 Tuulivoima Suomessa	8
2.1 Suomalaisen tuulivoiman historia	8
2.2 Tuulivoiman Suomessa	9
2.3 Tuulivoiman tukijärjestelmät Suomessa	11
2.4 Tuulivoimatekniikka / teollinen tuulivoima	14
2.5 Tuulivoiman tulevaisuus Suomessa	16
3 Sähkökauppa ja sähkönsiirto	18
3.1 Sähkömarkkinat ja hinnanmuodostus	18
3.2 Tuulivoiman asema sähköpörssissä	20
3.3 Suomessa toimiva sähköpörssi Nord pool ja eri markkina tyypit	20
3.3.1 Nord Pool	20
3.3.2 Vuorokausimarkkinat	21
3.3.3 Johdannaismarkkinat	21
3.3.4 Sähköpörssin futuurit ja optiot	22
3.3.5 Päivänsisäiset (Intraday) markkinat	22
3.4 Tasevastaava ja tasehallinnan toimijat	23
3.4.1 eSett	24
3.4.2 Taseselvitys sopimus	25
3.4.3 Tasepalvelun tarjoaja	25
3.4.4 Sähkön myyjä	26
3.5 Sähkönsiirto	26
4 Empiirian toteutus	28
4.1 Datan hankinta ja formatointi	28
4.2 Datan analysointi malli	28
4.3 Matemaattinen pohja	29

5 Tulokset	33
5.1 Tuulivoiman vaikutus vuorokausimarkkinoiden tuntihintoihin vuonna 2024	33
5.2 Syöttötariffien vaikutus vuorokausimarkkinoiden tuntihintoihin	37
5.3 Tuulivoiman vaikutus sähköpörssiin tulevaisuudessa	38
6 Johtopäätökset	39
Lähteet	42

Liitteet

Liite 1. SARIMAX mallinnuksen jäännösdiagnostiikka.

Liite 2. Liite 1. Taulukko sisältää kolmen SARIMAX-mallin parametrien tilastollisen tarkastelun ja ennustetarkkuuden vertailun.

Kuvat

Kuva 1. Kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti vuosittain. (VTT vuosiraportit 1998–2014; Suomenuusiutuvat vuosiraportit 2015–2024)	9
Kuva 2. Tuulivoimalan osat (Motiva 1, 2024)	15
Kuva 3. Meneillä olevat tuulivoimahankkeet Suomessa vuonna 2024 (Suomenuusiutuva 6, 2024)	16
Kuva 4. Tuulivoimalakoon kehitys (Motiva 1, 2024.)	17
Kuva 5. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin ja nettotuonti 2024	18
Kuva 6. Tuulivoimantuotannon ja sähkön vuorokausimarkkinoiden tuntihinnat vuonna 2024	33

Taulukot

Taulukko 1. Äärimmäisten tapahtumien analyysi	37
---	----

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
AFC:	Auto Forecast Combination – useiden ennusteiden yhdistämismenetelmä parhaan tarkkuuden saavuttamiseksi (Palma, 2016).
AR:	Autoregressive – aikajonemalli, jossa nykyinen havainto riippuu edellisistä arvoista (Palma, 2016).
BRP:	Balance Responsible Party – tasevastaava osapuoli, joka vastaa sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainosta (eSett, 2024).
BSP:	Tasepalvelun tarjoaja, joka vastaa sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisesta tarjoamalla säätökykyisiä resursseja, kuten kulutusta, varastointia tai tuotantoa. (eSett, 2024)
MA:	Moving Average – aikajonemalli, joka tasaa vaihtelua menneiden havaintojen keskiarvolla (Palma, 2016).
MAE:	Mean Absolute Error – keskimääräinen absoluuttinen virhe ennusteen tarkkuuden arviointiin (Palma, 2016).
MW:	Megawatti – tehon yksikkö, joka vastaa miljoonaa wattia (Energiateollisuus 1, 2024).
NBS:	Nordic Balance Settlement – pohjoismainen taseselvitysmalli, jota hallinnoi eSett (eSett, 2024).
PAFC:	Penalized Auto Forecast Combination – AFC-menetelmän muoto, jossa ennusteyhdistelmään lisätään rangaistusermi (Palma, 2016).
RMSE:	Root Mean Square Error – neliöllisten virheiden keskiarvon neliöjuuri (Palma, 2016).
SARIMAX:	Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with eXogenous factors on tilastollinen ennustemalli, jota käytetään aikajonojen analysointiin (Palma, 2016).

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Suomen sähköntuotanto uudistuu kovaa vauhtia. Euroopan unionin ja Suomen hallituksen linjaukset sekä maailman epävarma tilanne ajavat Suomen sähköntuotannon, jakelun ja myynnin infrastruktuuria kehittymään, jotta tavoitteet, kuten hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä, toteutuvat taloudellisesti kestäväällä tavalla niin valtion kuin kansalaistenkin näkökulmasta. (Suomenuusiutuvat 1, n.d.)

Suomen energiajärjestelmä koostuu kolmesta keskeisestä osa-alueesta: sähkön tuotannosta, jakelusta ja myynnistä. Sähköä tuotetaan hajautetusti eri puolilla maata monipuolisista energialähteistä, kuten ydinvoimasta, vesivoimasta, bioenergiasta ja yhä enenevässä määrin tuulivoimasta. Jakelusta vastaa valtakunnallinen kantaverkko (Fingrid Oyj) sekä alueelliset verkkoyhtiöt. Sähkön myynti toimii kilpailtuna markkinana, jossa sähköyhtiöt tarjoavat asiakkailleen erilaisia sopimuksia. Nämä kolme osa-aluetta muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jonka keskiössä ovat toimitusvarmuus, läpinäkyvä hinnoittelu ja markkinoiden toimivuus. (Fingrid, 2024)

Tuulivoima on vihreän siirtymän keskiössä, sillä se on uusiutuva ja vähäpäästöinen vaihtoehto perinteisille energiantuotantomuodoille. Tuulivoima on tällä hetkellä Suomen halvin ja toiseksi suurin sähköntuotantomuoto, ja sen arvioidaan nousevan suurimmaksi vuoteen 2030 mennessä. Sen keskeinen asema ja kasvuennuste tekevät siitä merkittävän tekijän sähkömarkkinoiden vuorokausihintojen muodostumisessa. Tuotanto on kuitenkin sääolosuhteista riippuvaista ja epätasaista, mikä aiheuttaa vaihtelua sähkömarkkinan hinnoissa. Tuulivoiman tuotannon epätasaisuus näkyy sähköpörssissä päivinä, jolloin hinta joko laskee tai nousee merkittävästi. (Suomenuusiutuvat 1, n.d.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tuulivoiman tuotannon vaikutusta sähköpörssin vuorokausihintoihin nyt ja tulevaisuudessa. Lisäksi tarkastellaan Suomen historian suurimman tuulivoimatuen, syöttötariffin, vaikutusta tuulivoiman kasvuun ja markkinahintaan. Tutkimuksen lopputuloksena pyritään ymmärtämään tuulivoiman ja sähkönhinnan välistä yhteyttä ja arvioimaan sen perusteella mahdollisia toimenpidetarpeita Suomen energiasektorilla. Aihe valikoitui tekijän oman kiinnostuksen pohjalta ja tarkentui opinnäytetyöprosessin ja ohjaajan ohjeistuksen myötä.

Tutkimuskysymykseen vastataan vertaamalla tuulivoimatuotantoa ja sähköpörssin vuorokausimarkkinoiden tuntihintoja, painottuen erityisesti vuoteen 2024, koska se tarjoaa ajankohtaisimman kuvan sodan ja pandemian jälkeisistä markkinoista. Lisäksi analysoidaan syöttötariffien vaikutusta sähkömarkkinoihin, sillä niillä on ollut ratkaiseva rooli tuulivoiman kehityksessä Suomessa.

1.2 Työn rakenne

Työn teoriaosuudessa käsitellään keskeiset käsitteet ja taustat, kuten suomalaisen tuulivoiman historia, nykytila ja tulevaisuuden näkymät. Erityisesti keskitytään tuulivoimatuotannon tukiin, kuten syöttötariffiin. Sähkökaupan ja sähkönsiirron luvut esittelevät sähkömarkkinoiden toimintaperiaatteita ja rakenneosia, kuten tasevastaavan roolin ja sähkön hinnanmuodostuksen.

Työn loppupuolella esitellään käytetty data, sen lähteet ja käsittelymenetelmät. Tämän jälkeen käydään läpi analyysin tulokset ja pyritään niiden perusteella vastaamaan työn tutkimuskysymyksiin erityisesti tuulivoiman vaikutuksesta vuorokausihintoihin ja syöttötariffien roolista tässä kokonaisuudessa.

2 Tuulivoima Suomessa

2.1 Suomalaisen tuulivoiman historia

Tuulivoiman kehitys Suomessa sai alkunsa vuonna 1986, kun Inkoolle rakennettiin Koppärnäsin 300 kilowatin koetuulivoimalaitos. Ensimmäinen tuulipuisto valmistui puolestaan Pohjanmaalle vuonna 1991. Korsnäsin tuulivoimapuisto koostui neljästä tuulivoimalasta, joiden yhteenlaskettu teho oli noin 800 kilowattia. 1990-luvulla uusien voimaloiden rakentaminen jatkui pääosin Pohjanmaan alueella. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

1990-luvulla rakennetut uudet voimalat toimivat tärkeinä tutkimuskohteina. Niiden avulla kartoitettiin tietoa Suomen tuuliolosuhteista ja ilmaston soveltuvuudesta tuulivoiman tuotantoon. Tämän aikakausi loi tutkimuksellista pohjaa, joka auttoi Suomen ensimmäinen tuuliatlaksen tekemisessä 2000-luvun puolella. Tuuliatlas oli tärkeä harppaus tuulivoimalle, sillä sen avulla pystytään arvioimaan eri alueiden tuulivoimapotentiaalia, sen kokonaisvaikutusta sähköjärjestelmään ja tämän myötä sijoituksen kannattavuutta. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

1990-luvun lopulla tuulivoiman rakentamista alettiin tukea valtion varoin. Tuen myötä uskallettiin investoida entistä enemmän uusiin voimaloihin. Ennätysvuonna 1999 tuulivoimakapasiteetti kaksinkertaistui. Kasvu ei kuitenkaan jatkunut tasaisena, vaan rakentaminen hidastui ja pysyi vähäisenä aina vuoteen 2009 saakka. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)



Kuva 1. Kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti vuosittain. (VTT vuosiraportit 1998–2014; Suomenuusiutuvat vuosiraportit 2015–2024)

Vuosi 2009 oli tuulivoimarakentamisen ja -kehityksen kannalta erityisen merkittävä Suomessa. Tuolloin syöttötariffiryhmän esitys valmistui ja loi pohjan syöttötariffijärjestelmän käyttöönotolle. Kun syöttötariffit otettiin täysimääräisesti käyttöön vuonna 2012, alkoi tuulivoimaloiden rakentaminen Suomessa ennennäkemättömällä nopeudella. Kuvasta 1. Voidaan havaita, kuinka kumulatiivinen kapasiteetti lähti voimakkaaseen kasvuun vuoden 2012 tienoilla. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Syöttötariffiohjelman kiintiö tuli käytännössä täyteen jo vuonna 2015, vaikka ohjelma sulkeutui virallisesti vasta vuonna 2017. Rakentaminen hidastui hetkellisesti, mutta jo vuonna, 2018, julkaistiin ensimmäinen markkinaehtoinen tuulivoimahanke. Tämä tarkoitti, että se rakennettiin kokonaan ilman valtiontukea. Tämän jälkeen tuulivoimakapasiteetti on jatkanut räjähdysmäistä kasvuaan markkinaehtoisesti aina tähän päivään saakka. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

2.2 Tuulivoiman Suomessa

Vuoden 2024 lopussa Suomessa oli asennettuna 8 358 MW tuulivoimakapasiteettia, jolla tuotettiin yhteensä 19,8 TWh sähköä. Tämän

myötä tuulivoimasta tuli Suomen toiseksi suurin sähköntuotantomuoto. (Energieollisuus 1, n.d.) Tuulivoima on erittäin suosittu energiantuotantomuoto, sillä se on edullinen sekä ilmasto- ja ympäristöystävällinen tapa tuottaa sähköä. Vaikka tuulivoima ei ole täysin päästötöntä, esimerkiksi rakentaminen ja purkaminen kuluttavat luonnonvaroja. Tuulivoimaa pidetään ympäristön kannalta positiivisena tuotantomuotona, koska se korvaa uusiutumattomia ja suuripäästöisiä energialähteitä. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Tuulivoimalat tuottavat elinkaarensa aikana yli 60-kertaisesti sen määrän energiaa, joka niiden rakentamiseen on kulunut. Laitokset rakennetaan pääosin automaattisiksi, joten työvoimaa tarvitaan lähinnä huoltoihin ja korjauksiin. Tuulivoimaloiden käyttöikä on keskimäärin 20–30 vuotta, ja niiden huoltotarve on kohtuullinen suhteessa laitoksen koko elinkaarikustannuksiin. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Tuulivoiman suurimpana haasteena on sen tuotannon vaihtelevuus: sähköntuotanto määräytyy tuuliolosuhteiden mukaan, eikä kapasiteetti aina vastaa kulutushuippuja. Voimakkaasti tuulisina päivinä tuotanto voi ylittää kysynnän ja hinnat painua jopa negatiivisiksi, kun taas heikosti tuulisina jaksoina hinnat voivat nousta nopeasti. Näiden vaihteluiden hallintaan tarvitaan tukitoimia, kuten säätövoimaloita ja energian varastointiratkaisuja, jotta sähköntarve voidaan täyttää myös tuulettomina ajankohtina. Tuulivoiman osuuden kasvaessa tuotantorakenteessa tasapainottamisen merkitys kasvaa entisestään. (Vattenfall, n.d.)

Arviolta noin 60 % tuulivoimasta tuotetaan vuoden kuuden kylmimmän kuukauden aikana. Tämä johtuu siitä, että talvikuukausina tuuliolosuhteet ovat suotuisimmat ja ilman tiheys suurempi, mikä lisää tuotetun energian määrää samalla ilmamäärällä. Tällä hetkellä Suomen suurimpien tuulivoimaloiden yksikköteho on noin 5 MW, mutta erityisesti merialueille rakennettavien laitosten kohdalla yksittäisten voimaloiden nimellisteho voi ylittää 15 MW:tä. Prototyypit ylittävät jopa 20 MW lukemiin. (Vattenfall, n.d.)

2.3 Tuulivoiman tukijärjestelmät Suomessa

Tuulivoima on saanut Suomessa useita erilaisia tukimuotoja vuosien varrella. Ensimmäinen merkittävä tuki otettiin käyttöön helmikuussa 1996, kun kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM) energiainvestointien tukijärjestelmä astui voimaan. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Tämän investointituen ansiosta tuulivoimahankkeet saattoivat saada jopa 40 % investointikustannuksista katettua tuella. Tuen suuruus oli kuitenkin projektikohtainen ja vaihteli huomattavasti 2000-luvun aikana. Alimmillaan tuki oli 25 %, yleisesti 30–35 %, ja korkeimmillaan 40 %. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Nykyisin energiatukea voi yhä myöntää investointihankkeille enintään 30 % ja selvityshankkeille jopa 40 %. Tuki on kuitenkin suunnattu ensisijaisesti uusille teknologioille, joita ei toteutettaisi ilman julkista rahoitusta. Koska tuulivoima on nykyisin jo taloudellisesti kannattavaa, se ei enää saa investointitukea yhtä helposti kuin 2000-luvulla. Käytännössä tuulivoimaloille ei ole myönnetty investointitukea vuoden 2010 jälkeen. Tämä liittyy siihen, että syöttötariffijärjestelmään osallistuminen edellytti, ettei voimalaitos ollut saanut muuta valtion tukea. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Samaan aikaan investointituen kanssa, vuosina 1996–2009, tuulivoimaloilla oli myös mahdollisuus saada sähköveron palautukseen perustuva tuki. Tämä tuki oli suuruudeltaan 0,69 snt/kWh eurokaudella ja 4,1 p/kWh markka-aikana, ja se myönnettiin kaikille tuulivoimaloille riippumatta investointituen saamisesta. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Syöttötariffijärjestelmä otettiin käyttöön Suomessa vuoden 2011 aikana osana EU:n ja Suomen hallituksen energiapoliittisia tavoitteita. Järjestelmän tarkoituksena oli lisätä uusiutuvan ja vähäpäästöisen energiantuotannon osuutta. Malli pohjautui muualla Euroopassa käytössä olleisiin tuotantotukijärjestelmiin. Syöttötariffi tuli voimaan vuonna 2011 ja sulkeutui tuulivoiman osalta 1.11.2017, minkä jälkeen siihen ei ole enää hyväksytty uusia

voimaloita. Aiemmin järjestelmään hyväksytyt voimalat saavat kuitenkin tukea koko 12-vuotisen sopimuskauden ajan. (Suomenuusiutuvat 2, n.d.)

Syöttötariffien tavoitteena oli ohjata ja vaikuttaa sähköntuotannon rakenteeseen tukemalla esimerkiksi tuulivoimaa. Tariffit ovat olleet voimassa eri aikoina eri voimalaitostyypeille, mutta pääpaino on ollut uusiutuvissa ja ympäristöystävällisissä tuotantomuodoissa. Tarkoituksena on ollut vahvistaa Suomen energiaomavaraisuutta ja valmistautua tulevaisuuden tarpeisiin. Valtaosa kaikista myönnettyistä syöttötariffituista on kohdistunut juuri tuulivoimatuotantoon. (Energiavirasto 1, 2024)

Tuulivoimalat pystyivät hakeutumaan syöttötariffijärjestelmään, mikäli ne eivät olleet saaneet muuta valtiontukea ja edustivat uusia laitoksia. Järjestelmään hyväksyttiin yhteensä 123 tuulivoimahanketta, joista 121 on edelleen toiminnassa. Näiden yhteiskapasiteetti on 2072 MW, ja ne tuottavat vuosittain noin 5,7 terawattituntia sähköä. (Energiavirasto 1, 2024)

Syöttötariffijärjestelmän tavoitehinta eli perustuki tuulivoimaloille on 83,5 €/MWh. Tästä hinnasta vähennetään kolmen kuukauden keskimääräinen markkinahinta, eli valtio maksaa voimaloille tavoitehinnan ja markkinahinnan erotuksen. Tämä takaa järjestelmässä mukana oleville tuottajille tasaisen ja ennakoitavan tulovirran. Jos markkinahinta laskee alle 30 €/MWh, tuki maksetaan tavoitehinnan ja 30 €/MWh:n erotuksesta. Näin ollen maksimissaan tuki voi olla 53,5 €/MWh. Negatiivisilta tuntihinnoilta tukea ei makseta. 2010-luvulla syöttötariffin keskimääräinen tukitaso on vaihdellut 30–50 €/MWh:n välillä. (Energiavirasto 1, 2024)

Syöttötariffijärjestelmä on maksanut valtiolle tähän mennessä noin 1,6 miljardia euroa, ja sen kokonaiskustannusten arvioidaan nousevan noin 2,1 miljardiin euroon, kun viimeiset voimalat poistuvat järjestelmästä vuonna 2030. (Energiavirasto 1, 2024)

Vaikka järjestelmän kustannukset nousivat odotettua korkeammiksi, sen katsotaan yleisesti saavuttaneen tavoitteensa. Erityisesti tuulivoimateknologian nopea kehitys ja tuotannon kasvu ovat osoittaneet järjestelmän tehokkuuden.

Vaikka nykytilanteessa tukien maksaminen saattaa vaikuttaa vanhentuneelta ratkaisulta, vuonna 2011 tukien käyttöönotto oli perusteltua. Järjestelmä loi tarvittavat kannusteet tuulivoiman nopealle yleistymiselle Suomessa.

(Energiavirasto 1, 2024)

Kuvasta 1. Voidaan havaita, että syöttötariffien myöntämisen aikana tuulivoiman kasvu Suomessa kiihtyi merkittävästi. Tuulivoima nousi merkittäväksi sähköntuotannon muodoksi 2010-luvulla. Vuodesta 2022 alkaen markkinaehtoisesti, eli ilman valtion tukea rakennetut tuulivoimalat ovat yleistyneet kannattavuuden parantuessa, mikä on käynnistänyt uuden kasvuvaiheen.

Syöttötariffien jälkeen käyttöön otettiin uusi tuotantotukimuoto, preemiojärjestelmä, joka on edelleen voimassa, vaikka siihen ei ole myönnetty uusia tukia vuoden 2018 ensimmäisen tarjouskilpailukierroksen jälkeen. Tällä hetkellä ei ole tiedossa uusia tarjouskilpailuja. (Energiavirasto 1, 2024)

Preemiojärjestelmä on teknologianeutraali uusiutuvan energian tuotantotuki, jonka tavoitteena on lisätä uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön osuutta Suomessa. Myös tuulivoimahankkeet voivat hakea tukea, ja tähän mennessä ainoa tukea saanut tuotantomuoto on ollut tuulivoima. Tuki myönnetään tarjouskilpailun perusteella. Vuonna 2018 järjestetty kilpailutus koski 1,4 TWh:n vuotuista sähköntuotantoa. Kilpailutuksessa parhaiten menestyivät hankkeet, jotka tarjosivat pienimmän tuen tarpeen eli preemion. Kilpailun perusteella järjestelmään hyväksyttiin kuusi sähköntuottajaa ja seitsemän hanketta. Kaikki tuulivoimahankkeita. Preemiota maksetaan 12 vuoden ajan, samaan tapaan kuin syöttötariffijärjestelmässä. Valtiolle koitunut keskimääräinen kustannus oli 2,5 €/MWh. (Energiavirasto 1, 2024)

Vuodesta 2019 alkaen Suomessa on rakennettu tuulivoimaa yhä enenevässä määrin täysin ilman valtion tukea, eli markkinaehtoisesti. Tämä kehitys on ollut mahdollinen pääasiassa teknologian nopean kehityksen ansiosta, mikä on tehnyt tuulivoimasta taloudellisesti kannattavaa. Esimerkiksi vuonna 2023

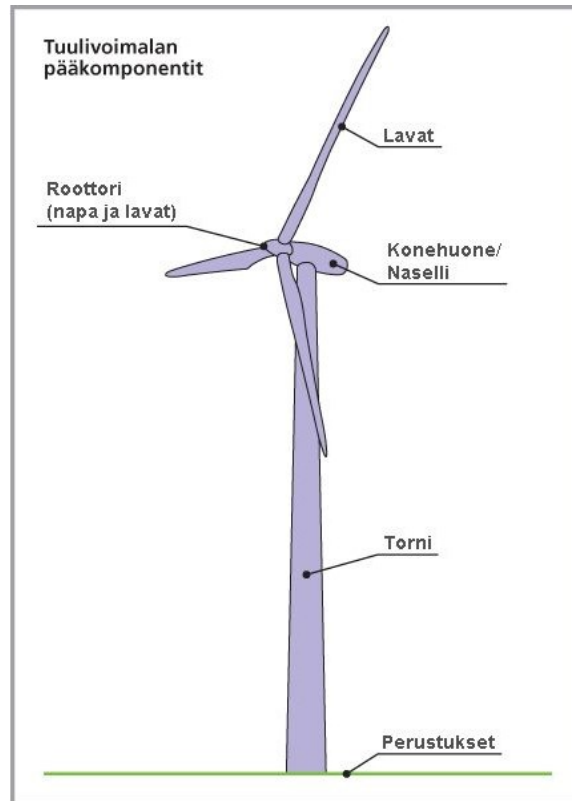
käyttöön otettu voimala oli noin 26 % tehokkaampi megawattituntituotannossa asennettua megawattikapasiteettia kohden verrattuna vuoden 2009 voimaloihin.

Lisäksi PPA-sopimukset (Power Purchase Agreement), eli pitkäaikaiset sähkönostosopimukset, ovat mahdollistaneet tuulivoiman rakentamisen ilman suoraa valtion tukea. PPA-sopimuksissa suuri sähkönkuluttaja, kuten teollisuusyritys, sitoutuu ostamaan tietyn määrän sähköä tuottajalta ennalta sovittuun hintaan koko sopimuskauden ajan, joka on yleensä yli 10 vuotta. Tämä luo vakaan tulon lähteen tuottajalle ja varmistaa sähkön hankinnan hintavakauden ostajalle. (Suomenuusiutuvat 3, n.d.)

2.4 Tuulivoimatekniikka / teollinen tuulivoima

Tuulivoimalat muuttavat tuulen liike-energian pyörimisliikkeeksi lapojen avulla. Lavat pyörittävät generaattoriin kytkettyä akselia, ja generaattori muuntaa pyörimisenergian sähköksi. Tuotettu sähkö johdetaan edelleen sähköverkkoon. Tällä hetkellä yleisimmät tuulivoimalat ovat kolmilapaisia, vaaka-akselisia ja niiden lavat kääntyvät tornin mukana tuulen suuntaan (katso kuva 2). (Motiva 1, 2024)

Tuulivoimalaitokset tarvitsevat tuulen nopeudeksi mallista riippuen vähintään noin 3 m/s voidakseen tuottaa sähköä. Voimaloiden teho kasvaa nopeasti tuulen nopeuden lisääntyessä. Nimellisteho saavutetaan yleensä, kun tuulen nopeus on 10–15 m/s. Tämän jälkeen, tuulen nopeuden kasvaessa edelleen, voimalan tuotantoa voidaan joutua rajoittamaan. Rajoitus tapahtuu tyypillisesti 15–25 m/s välillä. Mikäli tuulen nopeus nousee yli turvallisen rajan. Yleensä yli 25 m/s, voimalat pysäytetään vaurioiden välttämiseksi. (Motiva 1, 2024)



Kuva 2. Tuulivoimalan osat (Motiva 1, 2024)

Merituulivoimalat eivät juurikaan poikkea maatuulivoimaloista ulkonäöltään, mutta ne ovat yleensä huomattavasti suurempia. Erityisesti roottorit ovat suhteellisesti suurempia kuin maalla sijaitsevissa voimaloissa.

Merituulivoimaloiden perustukset rakennetaan vesialueille, ja tietyissä tapauksissa voidaan käyttää myös kelluvia perustuksia. (Suomenuusiutuvat 4, n.d.)

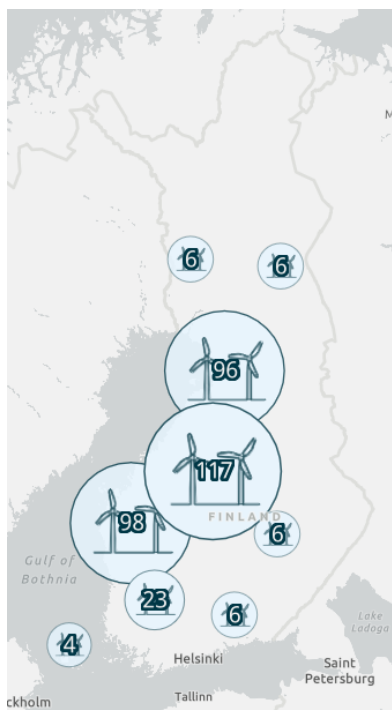
Merisää aiheuttaa rakenteille enemmän kulutusta kuin maalla, mikä on otettava huomioon sekä rakentamisessa että huollossa. Tämän vuoksi merituulivoimaloiden rakentaminen ja ylläpito on keskimäärin merkittävästi kalliimpaa kuin maavoimaloiden. Toisaalta merellä voidaan hyödyntää suurempia ja tehokkaampia voimaloita, mikä parantaa merituulivoiman tuottavuutta. (Suomenuusiutuvat 4, n.d.)

Nykyteknologialla maatuulivoimalat ovat Suomessa edelleen taloudellisesti kannattavampia, mutta kustannuserot ovat kaventuneet, ja investoinnit

merituulivoimaan ovat kasvaneet viime vuosina. Suomessa on toistaiseksi vain yksi merituulivoimapuisto, mutta useita tuhansien megawattien merituulihankkeita on suunnitteilla. (Suomenuusiutuvat 4, n.d.)

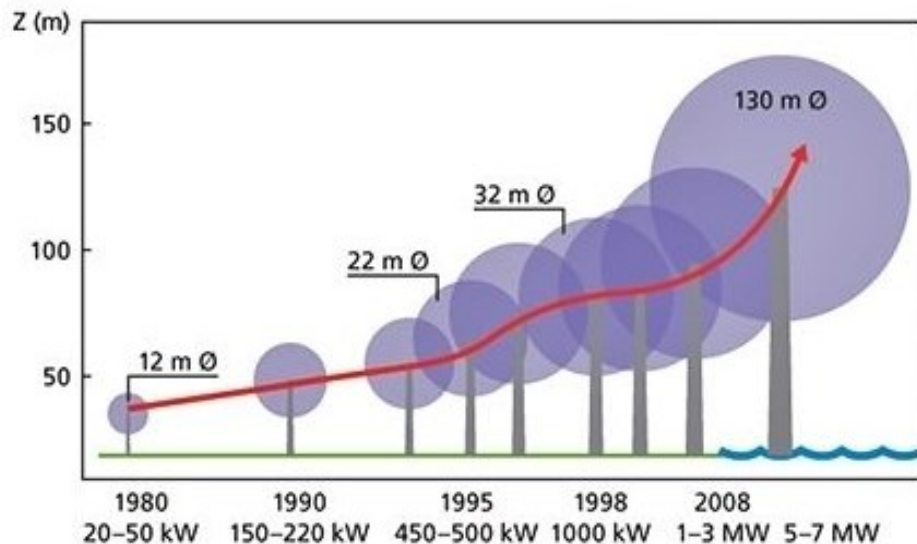
2.5 Tuulivoiman tulevaisuus Suomessa

Tuulivoiman ennustetaan nousevan Suomen suurimmaksi sähköntuotantomuodoksi vuoteen 2030 mennessä. Suomessa on yhteensä 423 käynnissä olevaa maatuulivoimalahanketta (katso kuva 3), joista valtaosa on luvitusvaiheessa. Hankkeet sijoittuvat pääosin rannikkoseuduille, missä tuuliolosuhteet ovat suotuisimmat kuin sisämaassa. Merituulivoiman heikompi kaupallinen menestys on toistaiseksi rajoittanut sen rakentamista, mutta myös merituulivoimaloita on suunnitteilla. Mikäli kaikki suunnitellut hankkeet toteutuvat, Suomeen saadaan yli 142 000 MVA uutta tuulivoimatehoa. Vuonna 2025 Suomeen odotetaan valmistuvan 174 uutta tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu teho on 1 129 MVA. (Suomenuusiutuvat 5, n.d.)



Kuva 3. Meneillä olevat tuulivoimahankkeet Suomessa vuonna 2024
(Suomenuusiutuva 6, 2024)

Kuvassa 4. esitetään tuulivoimaloiden koon kehitys vuosien varrella. Kehitystä ohjaa tavoite parantaa voimaloiden hyötysuhteita ja tuotantotehokkuutta. Suomessa tällä hetkellä rakenteilla olevien maatuulivoimaloiden teho sijoittuu 4–6 MW:n välille, mutta markkinoilla on jo saatavilla 8–10 MW:n tehoisia maavoimaloita. (Motiva 1, 2024.)



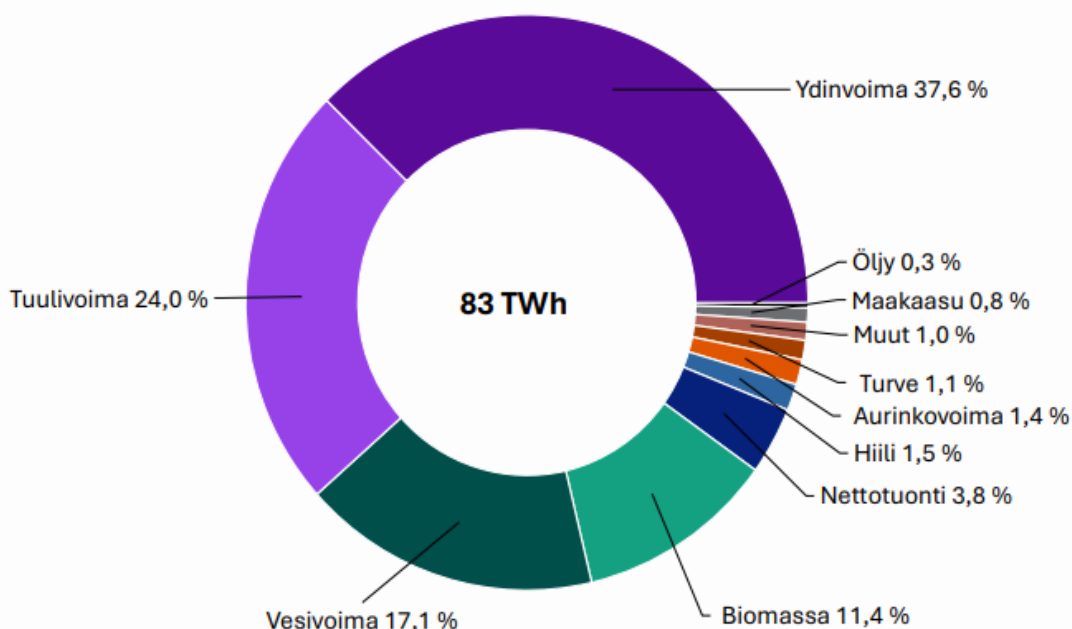
Kuva 4. Tuulivoimalakoon kehitys (Motiva 1, 2024.)

Suomen tuulivoimapotentiaali on lähes 70 000 MW. Vuoden 2024 lopussa asennettua kapasiteettia oli yhteensä 8 359 MW, mikä tarkoittaa, että kasvuvaraa on vielä merkittävästi. Kartoitetusta potentiaalista yli 40 000 megawattia on maatuulivoimaa, noin 17 000 megawattia sijoittuu Suomen aluevesille ja noin 10 000 megawattia Suomen talousvyöhykkeelle aluevesien ulkopuolelle. Tuulivoiman voimakas kasvu tulee kuitenkin vaatimaan merkittävän määrän uutta sähköverkon siirtokapasiteettia, jotta tuotettu energia saadaan tehokkaasti kulutuksen kohteisiin. (Nurmio & Pakarinen, 2024)

3 Sähkökauppa ja sähkönsiirto

3.1 Sähkömarkkinat ja hinnanmuodostus

Sähkömarkkinat ovat taloudellinen järjestelmä, jonka puitteissa sähköä tuotetaan, myydään ja ostetaan useiden eri toimijoiden välillä. Kuvassa 5 näkyy mitä energiantuotanto muotoja Suomessa on, näiden lähteiden energia on siis kaupan sähkömarkkinoilla. Tähän järjestelmään kuuluvat sähköntuottajat, jotka valmistavat sähköä eri energialähteistä, sähkön tukkukauppiat, jotka myyvät suuria määriä sähköä, vähittäismyyjät, jotka tarjoavat sähköä loppukäyttäjille, sekä siirtoverkosta vastaavat tahot. Suomessa sähkömarkkinoita hallinnoidaan osana pohjoismaista järjestelmää, joka yhdistää markkinat maiden välillä ja mahdollistaa sähkön tehokkaan jakelun kulutuksen tarpeiden mukaan (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024). Kilpailu sähkön tuotannossa ja myynnissä mahdollistaa kuluttajille valinnanvaraa, mutta sähkön siirto on viranomaisten valvomaa alueellista monopolia (Fingrid 2, 2024).



Kuva 5. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin ja nettotuonti 2024

Sähkön hinta määräytyy pääosin niin sanotulla tukkumarkkinalla, joka toimii sähköpörssin kautta. Suomessa tämä pörssi voi olla suurenmarkkinaosuuden omaava Nord Pool tai pienempi European Energy Exchange (Energiateollisuus 1, 2024)(EEX, 2024). Hintojen muodostuminen perustuu yksinkertaiseen kysynnän ja tarjonnan lakiin: mitä suurempi kysyntä suhteessa tarjontaan, sitä korkeampi hinta. Markkinahinta määritellään tunneittain, mikä tarkoittaa, että se voi vaihdella vuorokauden aikana merkittävästi. Sähkön tuotantomuodot, kuten ydinvoima, tuulivoima, vesivoima ja lämpövoima, tuovat tarjontaan vaihtelevuutta, kun taas kulutuksen määrään vaikuttavat esimerkiksi vuorokauden aika ja sääolosuhteet (Fingrid 2, 2024).

Yksi keskeisistä periaatteista hinnanmuodostuksessa on niin kutsuttu marginaalikustannusmalli. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkön markkinahinta asetetaan sen tuotantolaitoksen perusteella, jonka sähköä vielä tarvitaan kokonaiskysynnän täyttämiseksi. Tämä tuotantomuoto on usein se kallein, joka on vielä mukana tuotannossa kyseisellä tunnilla. Esimerkiksi kaasukäyttöinen voimalaitos voi olla tämä "viimeinen" tuottaja (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024). Tämän vuoksi kuluttajat voivat havaita suuria hintaeroja eri vuorokaudenaikoina. Yleensä yöllä sähkö on halvempaa, koska kysyntä on vähäisempää, kun taas aamuisin ja iltaisin hinnat voivat nousta kulutuspiikkien vuoksi (Energy Plaza, 2024).

Vaikka tuotannon ja myynnin puolella kilpailu vaikuttaa hinnoitteluun, sähkön siirtohinnoittelu perustuu säännelyihin käytäntöihin. Verkkoyhtiöt omistavat siirtoverkot alueillaan, eikä niiden toimintaa voi kilpailuttaa. Siksi niiden hinnoittelu perustuu viranomaisten, kuten Energiaviraston, valvontaan (Energiateollisuus 1, 2024). Sähkön loppuhinta koostuu kolmesta pääosasta: energian hinnasta, siirtohinnasta ja veroista. Näistä vain energian osuus on vapaasti kilpailutettavissa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024).

Sähkömarkkinat ovat jatkuvassa muutoksessa teknologisen kehityksen ja ilmastopoliittisten tavoitteiden vuoksi. Uusiutuvan energian tuotanto, kuten tuulivoima ja aurinkoenergia, lisääntyvät ja tekevät markkinoista entistä vaihtelevammat. Samalla kehitetään ratkaisuja energian varastointiin ja

kulutuksen joustoon, joiden avulla sähköjärjestelmä saadaan toimimaan entistä vakaammin. Kuluttajien rooli sähkömarkkinoilla on myös kasvamassa. Monet tuottavat sähköä itse esimerkiksi aurinkopaneelien avulla tai vaikuttavat kulutukseensa älykkäiden järjestelmien kautta (Energiateollisuus 1, 2024).

3.2 Tuulivoiman asema sähköpörssissä

Tuulivoima on viime vuosina noussut merkittäväksi sähköntuotantomuodoksi Suomessa, ja sen asema sähkömarkkinoilla on vahvistunut erityisesti teknologian kehittymisen ja investointien kasvun myötä. Tuulivoiman etuina ovat sen uusiutuvuus ja päästöttömyys, mikä tekee siitä tärkeän osan Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisesta. Sähkömarkkinoilla tuulivoiman erityispiirre on sen tuotannon vaihtelevuus: sähköä syntyy vain, kun tuulee, mikä aiheuttaa vaihtelua tarjonnassa ja siten vaikuttaa myös markkinahintaan. Esimerkiksi voimakas tuuli saattaa lisätä tarjontaa nopeasti ja painaa sähkön markkinahintaa alas, kun taas tyyntä jaksoa seuraa usein hintojen nousu. Tuulivoiman määrän kasvu lisääkin tarvetta joustaville sähkökulutuksen ja varastoinnin ratkaisuille sähköjärjestelmän tasapainottamiseksi (Energiateollisuus 1, 2024).

3.3 Suomessa toimiva sähköpörssi Nord pool ja eri markkina tyypit

3.3.1 Nord Pool

Nord Pool on Pohjoismaiden ja Baltian yhteinen sähköpörssi, jossa suurin osa Suomenkin tukkusähkökaupasta käydään. Se toimii keskeisenä markkinapaikkana, jossa sähkön ostajat ja myyjät tekevät kauppaa seuraavan päivän sähkön toimituksista. Pörssin tärkein markkinatuote on niin sanottu vuorokausimarkkina, jossa sähkön hinta määräytyy tunneittain sen perusteella, millä hinnalla eri tuotantolaitokset ovat valmiita myymään sähköä ja mitä ostajat ovat valmiita maksamaan. Nord Poolin hinnoittelumalli perustuu marginaalikustannukseen: kunkin tunnin hinta määräytyy sen tuotannon

mukaan, jota tarvitaan viimeiseksi kysynnän kattamiseksi (Energiateollisuus 1, 2024). Nord Pool parantaa markkinoiden läpinäkyvyyttä ja kilpailua julkaisemalla reaaliaikaista tietoa hinnoista ja volyymeista, mikä mahdollistaa tehokkaan sähkön hinnanmuodostuksen koko alueella.

3.3.2 Vuorokausimarkkinat

Vuorokausimarkkinat aiemmin tunnettu termillä "Spot-markkinat", ovat sähkömarkkinoiden keskeisin kaupankäyntialue, jossa suurin osa sähkökaupasta tapahtuu. Näillä markkinoilla myyjät ja ostajat tekevät kauppaa sähköstä päivää ennen sen toimitusta. Vuorokausimarkkinoiden hinta muodostuu jokaiselle tunnille erikseen seuraavalle päivälle, perustuen kysynnän ja tarjonnan tasapainoon. Myyjät tarjoavat sähköä eri hinnoilla ja määrillä, ja ostajat tekevät vastaavasti ostoja tarjottujen ehtojen mukaisesti. Se tunti, jolloin tarjonta ja kysyntä kohtaavat, määrittää kyseisen tunnin markkinahinnan. Tämä järjestelmä ohjaa tuotantoa ja kulutusta tehokkaasti ja tuo hinnoitteluun avoimuutta. Vuorokausimarkkinoiden hintavaihtelut voivat olla suuria esimerkiksi sään, kulutushuippujen tai tuotantotilanteen mukaan (Energiateollisuus 1, 2024).

3.3.3 Johdannaismarkkinat

Johdannaismarkkinat sähköalalla ovat erillinen mutta tärkeä osa sähkömarkkinoiden kokonaisuutta. Niillä ei käydä kauppaa fyysisellä sähköllä, vaan sähköön liittyvillä sopimuksilla, joiden arvo määräytyy tulevien sähköhintojen mukaan. Tällaiset sopimukset voivat koskea esimerkiksi hintojen kiinnittämistä tietylle ajanjaksolle. Sähköyhtiöt, suuret teollisuuden sähkönkäyttäjät ja muut markkinaosapuolet hyödyntävät johdannaismarkkinoita suojautuakseen sähkön hinnan vaihtelulta ja hallitakseen taloudellisia riskejä. Näiden markkinoiden avulla voidaan "lukita" tulevaa hintaa etukäteen, mikä parantaa ennustettavuutta ja vakautta budjetoinnissa. Johdannaisten avulla yritys voi esimerkiksi varmistaa tietyn hintatason seuraavalle vuodelle

riippumatta siitä, miten vuorokausimarkkinahinnat muuttuvat (Energiateollisuus 1, 2024). Suomessa johdannaiskauppaa käydään muun muassa Nasdaq Commodities -pörssissä, joka tarjoaa tuotteita sähkön hintasuojaukseen koko Pohjoismaiden alueella.

3.3.4 Sähköpörssin futuurit ja optiot

Sähkön futuurit ja optiot ovat johdannaisinstrumentteja, joita käytetään sähkömarkkinoilla hintariskien hallintaan. Ne mahdollistavat sähkön hinnan kiinnittämisen tulevaisuuteen, jolloin tuotannon ja kulutuksen osapuolet voivat suojautua hintavaihtelulta. Futuurisopimuksessa ostaja ja myyjä sopivat ennalta määrätyn hinnan tietylle sähkön määrälle tulevaisuudessa. Optio puolestaan antaa oikeuden, mutta ei velvollisuutta, ostaa tai myydä sähköä tiettyyn hintaan sovittuna ajankohtana. Sähkön hinnan vaihtelu erityisesti uusiutuvan tuotannon, kuten tuulivoiman, kasvaessa tekee johdannaisten merkityksen entistä keskeisemmäksi. Yritykset ja sähkön tuottajat voivat näiden instrumenttien avulla vakauttaa kassavirtojaan ja varautua markkinoiden epävarmuuteen. Johdannaismarkkinat tukevat näin ollen sähkömarkkinoiden toimivuutta ja ennustettavuutta etenkin tilanteissa, joissa hintavaihtelut ovat suuria. (Fingrid 1, 2024)

3.3.5 Päivänsisäiset (Intraday) markkinat

Päivänsisäiset (Intraday) sähkömarkkinat, täydentävät vuorokausimarkkinoita tarjoamalla mahdollisuuden sähkökauppaan lyhyellä aikavälillä, jopa tuntia ennen toimitushetkeä. Näillä markkinoilla kauppaa käydään sen jälkeen, kun vuorokausimarkkinoiden hinta on jo määräytynyt, mutta tuotanto- ja kulutusennusteet voivat vielä muuttua. Intraday-markkinat ovat tärkeitä erityisesti uusiutuvan energian, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, yleistyessä, koska niiden tuotanto voi vaihdella nopeasti sääolosuhteiden mukaan. Jos esimerkiksi tuulivoiman tuotanto yllättäen laskee, voidaan intraday-markkinoilla hankkia puuttuva sähkö ennen toimitushetkeä (Energiateollisuus 1, 2024). Näin

markkinat tukevat järjestelmän tasapainoa ja parantavat toimitusvarmuutta. Suomessa intraday-kauppaa käydään Nord Poolin ja Euroopan laajuisen SIDC-järjestelmän (Single Intraday Coupling) kautta, joka mahdollistaa rajat ylittävän sähkökaupan vielä viime hetkellä.

3.4 Tasevastaava ja tasehallinnan toimijat

Tasevastaava (engl. Balance Responsible Party, BRP) on sähkömarkkinoilla toimiva yritys tai toimija, joka vastaa siitä, että sen hallinnoima sähkön tuotanto, kulutus ja kaupankäynti pysyvät tasapainossa jokaisella markkinajaksolla. Tasevastaavan tehtävänä on ennakoida ja suunnitella sähköntuotanto ja -kulutus tarkasti sekä huolehtia siitä, että mahdolliset poikkeamat katetaan taloudellisesti järjestelmän tasapainon säilyttämiseksi (eSett, 2024). Tämä rooli on välttämätön sähkön toimitusvarmuuden takaamiseksi, sillä sähköä ei voi varastoida suuria määriä, ja siten tuotannon ja kulutuksen on vastattava toisiaan reaaliajassa.

Tasevastaava toimii sopimus pohjaisesti sekä kantaverkkoyhtiön (kuten Suomessa Fingridin) että eSettin kanssa. Kantaverkkoyhtiö vastaa fyysisestä tasapainosta sähköjärjestelmässä, kun taas eSett toimii keskitettynä taseselvitys yksikkönä, joka hoitaa tasepoikkeamien laskennan, taloudellisen selvityksen ja raportoinnin kaikissa Pohjoismaissa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tasevastaava raportoi eSettille sähkön ostot, myynnit, tuotannon ja kulutuksen ennusteet sekä kahdenväliset kaupat. Jos toteutuneet määrät eroavat ilmoitetuista suunnitelmista, syntyy tasepoikkeama, josta tasevastaava on taloudellisesti vastuussa (eSett, 2024).

Tasevastaavan toiminta liittyy sekä sähkön vähittäismyyntiin että tuotantoon. Esimerkiksi sähkön myyjällä täytyy olla sopimus tasevastaavan kanssa, joka ottaa vastuun kyseisen myyjän asiakkaiden sähkönkulutuksen tasapainosta. Vastaavasti tuotantoyhtiöiden tai itse sähköä tuottavien yritysten on joko itse toimittava tasevastaavana tai tehtävä sopimus sellaisen kanssa. Yhdellä toimijalla voi olla myös useita rooleja: se voi olla yhtä aikaa sähkön myyjä,

tasevastaava ja jopa tasepalvelun tarjoaja, mikäli se osallistuu myös sähköjärjestelmän säätöön ja reservimarkkinoihin. (eSett, 2024).

Pohjoismainen taseselvitysmalli, jota eSett hallinnoi, yhdenmukaistaa säännöt ja toimintatavat kaikkien osallistuvien maiden kesken. Tämä helpottaa erityisesti rajat ylittävää kaupankäyntiä ja luo tasapuoliset kilpailuolosuhteet kaikille markkinatoimijoille. Tasevastaavan tehtävien yhtenäistäminen eri maissa alentaa myös tasehallinnan kustannuksia ja tukee toimivampien ja kilpailukykyisempien sähkömarkkinoiden kehittämistä (eSett, 2024).

3.4.1 eSett

eSett Oy on pohjoismainen taseselvitysyksikkö, joka vastaa sähkön tukkumarkkinoiden taloudellisesta taseselvityksestä Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Yhtiö on Fingridin (Suomi), Svenska kraftnätin (Ruotsi), Statnetin (Norja) ja Energinetin (Tanska) yhdessä omistama palveluorganisaatio. Sen keskeinen tehtävä on laskea kunkin markkinaosapuolen, erityisesti tasevastaavien ja tasepalvelun tarjoajien, sähkömarkkinoilla syntyneet tasepoikkeamat ja vastata niiden taloudellisesta selvityksestä (eSett, 2024).

eSettin toiminta tuo merkittäviä hyötyjä sähkömarkkinoiden toimivuudelle. Se luo yhtenäiset menettelytavat ja sääntökäytännöt koko Pohjoismaiden alueelle, mikä helpottaa markkinoiden rajat ylittävää toimintaa. Lisäksi se parantaa avoimuutta ja tehokkuutta koko taseselvitysketjussa. eSett kerää, hallinnoi ja raportoi mittaus- ja kauppätietoja, hoitaa vakuusvaateiden laskennan ja valvonnan sekä laskuttaa poikkeamista syntyneet maksut. Näiden tehtävien kautta se tukee sähköjärjestelmän luotettavaa toimintaa ja mahdollistaa oikeudenmukaisen vastuunjaon osapuolten kesken (eSett, 2024).

3.4.2 Taseselvitys sopimus

Taseselvityssopimus on virallinen sopimus tasevastaavan ja eSettin välillä, jossa määritellään osapuolen oikeudet ja velvollisuudet taseselvitysjärjestelmässä. Sopimus on edellytys sille, että tasevastaava voi osallistua sähkömarkkinoille ja kantaa vastuuta tuotannon ja kulutuksen tasapainosta. Taseselvityssopimuksessa sovitaan muun muassa raportointivaatimuksista, vakuusvaatimuksista, tietojenvälityksestä ja maksujärjestelyistä. Sopimus luo selkeän oikeudellisen perustan eSettin roolille puolueettomana selvittäjänä ja varmistaa, että kaikki markkinaosapuolet noudattavat samoja sääntöjä (eSett, 2024).

3.4.3 Tasepalvelun tarjoaja

Tasepalvelun tarjoaja on sähkömarkkinoiden toimija, joka huolehtii sähkön kulutuksen tai tuotannon tasehallinnasta jonkun muun osapuolen, kuten sähkönmyyjän tai pientuottajan, puolesta. Se voi olla esimerkiksi energiayhtiö, jolla on tarvittavat järjestelmät, asiantuntemus ja sopimukset toimia tasevastaavana toisten markkinatoimijoiden nimissä. Tasepalvelun tarjoaja raportoi toteutuneet sähkön määrät ja vastaa mahdollisista tasepoikkeamista taseselvityksessä. Tämä rooli on tärkeä erityisesti pienemmille toimijoille, jotka eivät halua tai pysty itse hoitamaan tasevastaavan tehtäviä. Yksi markkinatoimija voi tukeutua useampaankin tasepalvelun tarjoajaan eri rooleissa, esimerkiksi tuotannon ja kulutuksen osalta (eSett, 2024).

Lisäksi BSP:n on täytettävä tietyt vaatimukset toimiakseen markkinoilla. Näitä ovat muun muassa rekisteröityminen taseselvitysjärjestelmään, sopimusten tekeminen eSettin kanssa sekä kyky hallita mittaus- ja kauppatietojen ilmoittamista ajantasaisesti. Palveluntarjoajan tulee kyetä osoittamaan riittävät tekniset ja taloudelliset valmiudet hoitaa tehtävänsä luotettavasti. Tasepalvelun tarjoajalla on myös velvollisuus seurata jatkuvasti asiakkaidensa sähkökäyttöä ja reagoida poikkeamiin, jotta koko sähköjärjestelmä pysyy

tasapainossa. Tämän vuoksi palveluntarjoajan rooli on paitsi hallinnollinen, myös operatiivinen osa sähkömarkkinoiden toimintaketjua. (eSett, 2024).

BSP:t voivat lisäksi osallistua Fingridin reservimarkkinoille tarjoamalla säätökykyistä kulutusta, sähkövarastoja tai tuotantoa. Näin ne eivät ainoastaan auta taseen hallinnassa, vaan myös aktiivisesti edistävät sähköjärjestelmän vakautta ja joustavuutta, erityisesti tilanteissa, joissa sähköntuotanto vaihtelee tai kysyntä poikkeaa ennusteista. (eSett, 2024).

3.4.4 Sähkön myyjä

Sähkönmyyjä on yritys, joka myy sähköä loppukäyttäjille eli kuluttajille ja yrityksille. Toimiakseen sähkömarkkinoilla sähkönmyyjän on tehtävä sopimus tasevastaavan kanssa, joka huolehtii myyjän asiakkaiden kulutuksen tasapainottamisesta markkinoilla. Sähkönmyyjä ilmoittaa asiakkaidensa kulutuksen ennusteet ja asiakastiedot markkinajärjestelmään, ja se vastaa asiakkaiden energialaskutuksesta. Vaikka sähkönmyyjä ei ole suoraan vastuussa tasepoikkeamista, sen toiminta vaikuttaa merkittävästi tasevastaavan laskentaan ja kustannuksiin. Luotettava tiedonvaihto sähkönmyyjän ja tasevastaavan välillä on välttämätöntä taseselvityksen tarkkuuden kannalta (eSett, 2024).

3.5 Sähkönsiirto

Sähkönsiirto on olennainen osa sähköjärjestelmää ja sähkömarkkinoita, sillä sen avulla tuotettu sähkö toimitetaan voimalaitoksilta kuluttajille. Toisin kuin sähkön tuotanto ja myynti, sähkönsiirto ei ole kilpailtu markkina, vaan alueellisesti järjestetty luonnollinen monopoli. Tämä tarkoittaa, että siirtoverkkoa hallinnoi kullakin alueella yksi verkkoyhtiö, jonka toimintaa valvotaan tarkoin viranomaisten, kuten Energiaviraston, toimesta. Suomessa valtakunnallisen kantaverkon ylläpidosta ja kehittämisestä vastaa Fingrid Oyj, joka on valtion osittain omistama yhtiö. Kantaverkko on korkean jännitteen sähkölinjojen

muodostama selkäranka, jonka tehtävänä on siirtää suuria määriä sähköä eri alueiden välillä sekä varmistaa sähköjärjestelmän tekninen vakaus (Fingrid 3, 2024).

Fingridin keskeinen tehtävä on varmistaa, että sähkön tuotanto ja kulutus pysyvät jatkuvasti tasapainossa koko maan mittakaavassa. Tämä on elintärkeää, koska sähköä ei voi varastoida merkittävässä määrin, vaan sitä täytyy tuottaa juuri niin paljon kuin sitä kulutetaan joka hetki. Fingrid seuraa jatkuvasti sähköjärjestelmän tilaa ja puuttuu mahdollisiin poikkeamiin esimerkiksi säätövoiman avulla. Se myös ennustaa kulutuksen kehitystä ja varautuu häiriötilanteisiin, kuten voimajohtojen vikoihin tai tuotantokatkoksiin. Näiden toimien kautta Fingrid varmistaa toimitusvarmuuden eli sen, että sähköä on saatavilla koko ajan eri puolilla Suomea (Fingrid 3, 2024).

Fingridillä on myös keskeinen rooli markkinoiden toimivuuden edistäjänä. Se ylläpitää läpinäkyvää tietojärjestelmää, jossa julkaistaan ajankohtaista dataa sähkön kulutuksesta, tuotannosta, siirtokapasiteetista ja markkinahintojen kehityksestä. Tämä avoimuus tukee markkinaosapuolien päätöksentekoa ja mahdollistaa tehokkaamman sähkönkäytön. Lisäksi Fingrid osallistuu kansainväliseen yhteistyöhön erityisesti Pohjoismaiden ja Baltian maiden kanssa, jotta sähkönsiirto yli rajojen olisi mahdollisimman sujuvaa ja markkinat toimisivat yhtenäisesti (Fingrid 3, 2024). Fingridin investoinnit kantaverkon laajentamiseen ja modernisointiin ovat välttämättömiä erityisesti nyt, kun uusiutuvan energian, kuten tuulivoiman, tuotanto kasvaa nopeasti ja hajautuneemmin eri puolille maata. Näiden muutosten myötä siirtoverkon joustavuus ja kapasiteetti nousevat yhä tärkeämpään asemaan tulevaisuuden energiajärjestelmässä.

4 Empiirian toteutus

4.1 Datan hankinta ja formatointi

Työssä käytettiin Suomen vuoden 2024 tuulivoimatuotannon tuntikohtaisia arvoja sekä sähköpörssin vuorokausimarkkinoiden hintoja. Sähkön hintoihin sisällytettiin arvonlisävero, koska se tarjoaa realistisemmän kuvan markkinoiden tilasta loppukäyttäjän näkökulmasta, mikä on hyödyllistä myöhemmässä analyysissä. Vaikka arvonlisäveron sisällyttäminen saattaa lisätä pientä virhettä, sen ollessa prosentuaalisesti vakio ei vaikutus ole tilastollisesti merkittävä näin suuressa otannassa.

Vuosi 2024 valittiin analyysin ajanjaksoksi, koska se on ensimmäinen täysi kalenterivuosi, jonka tilastoihin eivät enää merkittävästi vaikuta COVID-19-pandemian tai Ukrainan sodan aiheuttamat poikkeusolosuhteet. Vanhemmat tilastot eivät ole vertailukelpoisia, sillä tuulivoimatuotanto on ollut vielä vähäistä, eikä vastaa nykyistä tuotantomäärää tai sen markkinavaikutuksia. Näin ollen vuosi 2024 antaa parhaan mahdollisen näkymän tuulivoiman vaikutuksesta sähkön vuorokausihintoihin sekä luotettavan pohjan tulevaisuuden ennakointiin ja arviointiin.

Tuntikohtainen tuulivoimadata on peräisin Energiateollisuudelta (Energiateollisuus 2, 2024) ja vuorokausihinnat puolestaan ENTSO-E:n sähkömarkkinaportalista (ENTSO-E, 2024). Kumpikaan tietoaieisto ei sisältänyt näkyviä virheitä, ja arvot vastasivat yleisesti tunnettua markkinatietoa. Kokonaisuutta verrattiin myös Suomenuusiutuvat-järjestön julkaisemiin lukuihin (Suomenuusiutuvat 7, 2024).

4.2 Datan analysointi malli

Datasetit yhdistettiin CSV-tiedostoksi, jonka jälkeen käytin Pythonin pandas-kirjastoa muotoilemaan tiedot haluttuun formaattiin. Formatointi helpotti datan käyttöä myöhemmissä analyyseissä. Esimerkiksi aikaleimat muunnettiin ISO

8601 -muotoon, ja Suomessa käytettävät desimaalierottimet (pilkut) vaihdettiin pisteiksi, jotta tiedot olivat yhteensopivia muiden Python-kirjastojen kanssa. Datan siivouksessa datasetti käytiin läpi ja varmistettiin, ettei siinä ollut virheellisiä tai puuttuvia arvoja.

Datan pääasiallinen analyysi tehtiin aiemmin esitellyllä SARIMAX-mallilla (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables). Nimensä mukaisesti malli koostuu seuraavista komponenteista: kausiluonteisuus (seasonal), autoregressiivisyys (autoregressive), integrointi (integrated), liukuva keskiarvo (moving average) ja ulkoiset selittävät muuttujat (exogenous regressors). SARIMAX on ARIMA-mallin laajennus, joka hyödyntää entistä kattavammin käytössä olevaa dataa. Se on suunniteltu havaitsemaan autokorrelaatiota, trendejä, kausivaihteluita sekä ulkoisten tekijöiden vaikutuksia, ominaisuuksia, joita yksinkertaisemmat mallit, kuten lineaarinen regressio, eivät pysty käsittelemään tehokkaasti.

SARIMAX on laajasti käytetty malli tieteellisessä tutkimuksessa ja se on todettu toimivaksi analysoitaessa pitkiä aikasarjoja. Se on vakiintunut menetelmä, kun tutkitaan muuttujien vaikutuksia pitkän aikavälin datasarjoissa. Malli kykenee tehokkaasti erottamaan taustalla vaikuttavat tekijät, jolloin analyysissä voidaan keskittyä selkeämmin tutkittavien muuttujien välisiin yhteyksiin. On kuitenkin huomattava, että SARIMAX ei pysty kompensoimaan puuttuvia muuttujia. Parhaiden tulosten saavuttamiseksi mallinnukseen tulisi sisällyttää mahdollisimman monta merkittävää selittävää muuttujaa. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, jolloin mallin tuottamat tulokset voivat silti olla tilastollisesti merkitseviä, riippuen käytettävän datan laadusta ja määrästä (Palma, 2016).

4.3 Matemaattinen pohja

SARIMAX-analyysi suoritettiin käyttäen Python-ohjelmointikieltä. Työssä käytetyt Python-kirjastot olivat pandas, numpy, statsmodels, sklearn ja matplotlib.

SARIMAX-mallinnus noudatti seuraavia matemaattisia periaatteita. Mallinnus aloitettiin tarkistamalla aikasarjan stationaarisuus, eli sen tilastollisten ominaisuuksien pysyvyys ajassa. Stationaarisuuden testaus tehtiin sähkönhintadatalle käyttäen Augmented Dickey-Fuller -testiä (ADF), jonka soveltamista kuvataan kaavassa 1. (Palma, 2016) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$\Delta y_t = \alpha + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta y_{t-i} + u_t, \quad (1)$$

ADF-testi kertoo, onko aikasarjadata stationääristä vai ei. Stationaarisuus tarkoittaa sitä, että datan keskiarvo ja varianssi pysyvät vakioina ajan myötä. Monet aikasarja-analyysin menetelmät, kuten tässä työssä käytetty SARIMAX-malli, edellyttävät datan olevan stationääristä, jotta malli toimii oikein.

Mikäli data ei ole valmiiksi stationääristä, sitä voidaan muokata *differencing*-menetelmällä, eli erotuserottelulla. Tämä menetelmä muuntaa ei-stationääriseen datan stationääriseksi poistamalla siitä esimerkiksi pitkän aikavälin trendin. Tällöin analyysin tekeminen on matemaattisesti perusteltua. Erotuserottelu tehdään käyttämällä kaavaa 2. (Palma, 2016) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}, \quad (2)$$

Autokorrelaatiofunktio (ACF) on yksi SARIMAX-mallin keskeisistä komponenteista, ja sen laskeminen on välttämätöntä mallin oikealle toiminnalle. ACF kuvaa, kuinka lineaarisesti nykyinen datapiste korreloi aiempien datapisteiden kanssa tietyllä viiveellä. Tätä ilmiötä kutsutaan *autoregressioksi* (AR). Autokorrelaation arvo laskettiin kaavan 4 mukaisesti. (Palma, 2016) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$\rho(k) = \frac{\text{Cov}(y_t, y_{t-k})}{\text{Var}(y_t)}, \quad (3)$$

Osittainen autokorrelaatiofunktio (PACF) on ACF:n tavoin olennainen osa SARIMAX-mallia. PACF mittaa korrelaatiota alkuperäisen ja tietyn viiveen

datapisteiden välillä poistamalla väliin jäävien datapisteiden vaikutuksen. Toisin sanoen PACF kertoo, voidaanko lähtö- ja päätösarvon perusteella ennustaa niiden välillä tapahtuneita muutoksia suoraan. Tähän liittyvää mallin komponenttia kutsutaan liukuvaksi keskiarvoksi (MA, Moving Average). (Palma, 2016) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$\phi_{kk} = \text{corr}(y_t, y_{t-k} \mid y_{t-1}, \dots, y_{t-k+1}), \quad (4)$$

Kausiluonteinen ja ei-kausiluonteinen "differencing" esitetään kaavoissa 5 ja 6. Ne lisäävät SARIMAX-malliin kyvyn käsitellä kausiluonteisuutta, jolloin malli pystyy huomioimaan säännöllisesti toistuvat ilmiöt, kuten viikkorytmit, päivittäiset vaihtelut tai kuukausittaiset syklit. Tässä työssä kausiluonteisuutta ei ole mallinnettu erikseen differenssien avulla, vaan se on sisällytetty suoraan AR- ja MA-komponenttien kautta. (Palma, 2016.) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$(1 - L)^d y_t, \quad (5)$$

Kaavaa 5 käytetään trendin poistamiseen.

$$(1 - L^s)^D y_t, \quad (6)$$

Kaavaa 6 ei kuitenkaan tarvita erikseen, sillä sen funktio toteutetaan muun mallin osien kautta. Yhdessä aiemmat analyysit, kuten stationaarisuustestaus ja autokorrelaatiot, auttavat määrittämään SARIMAX-mallin vaatimat lähtöarvot. Näiden arvojen avulla malli voi tunnistaa yhtenäisyyksiä datassa sekä arvioida, kuinka merkittävästi tuulivoiman tuotanto vaikuttaa sähköpörssin vuorokausihintoihin. SARIMAX-mallin yleinen kaava on esitetty kaavassa 7. Tässä työssä käytetyt malliparametrit ovat (1,1,0; 1,0,1, 24), jotka pohjautuvat aiemmin määritelyihin arvoihin. Näiden avulla SARIMAX pystyy mallintamaan työn keskeisiä kysymyksiä. (Palma, 2016.) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$\Phi(L^s) \phi(L) (1 - L)^d (1 - L^s)^D y_t = c + \Theta(L^s) \theta(L) \varepsilon_t + \beta' x_t + \varepsilon_t, \quad (7)$$

Ljung–Box-menetelmää (kaava 8) käytetään varmistamaan, että mallinnus toimii oikein ja heijastaa aineiston dynaamisia rakenteita luotettavasti.

Menetelmä testaa, onko mallin jäännöstermien autokorrelaatio tilastollisesti merkittävä, ja näin arvioi mallin soveltuvuutta. (Palma, 2016.) (Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019).

$$Q(m) = N(N + 2) \sum_{k=1}^m \frac{\hat{\rho}(k)^2}{N-k}, \quad (8)$$

MAE eli absoluuttinen virhe tälle SARIMAX mallille saatiin kaavalla 9 ja RMSE eli neliövirhe lasketaan tälle SARIMAX-mallille kaavalla 10.

$$\text{MAE} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H |y_{T+h} - \hat{y}_{T+h}|, \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{H} \sum_{h=1}^H (y_{T+h} - \hat{y}_{T+h})^2}, \quad (10)$$

Virhearvot kertovat mallin toimivuudesta ja tarkkuudesta verrattuna perinteiseen regressioanalyysiin. SARIMAX-mallinnuksen matemaattinen pohja perustui teokseen *Palma, W. (2016)* ja sen soveltamista tehtiin *Sergei Kulakovin ja Florian Zielin (2019)* mukaisesti.

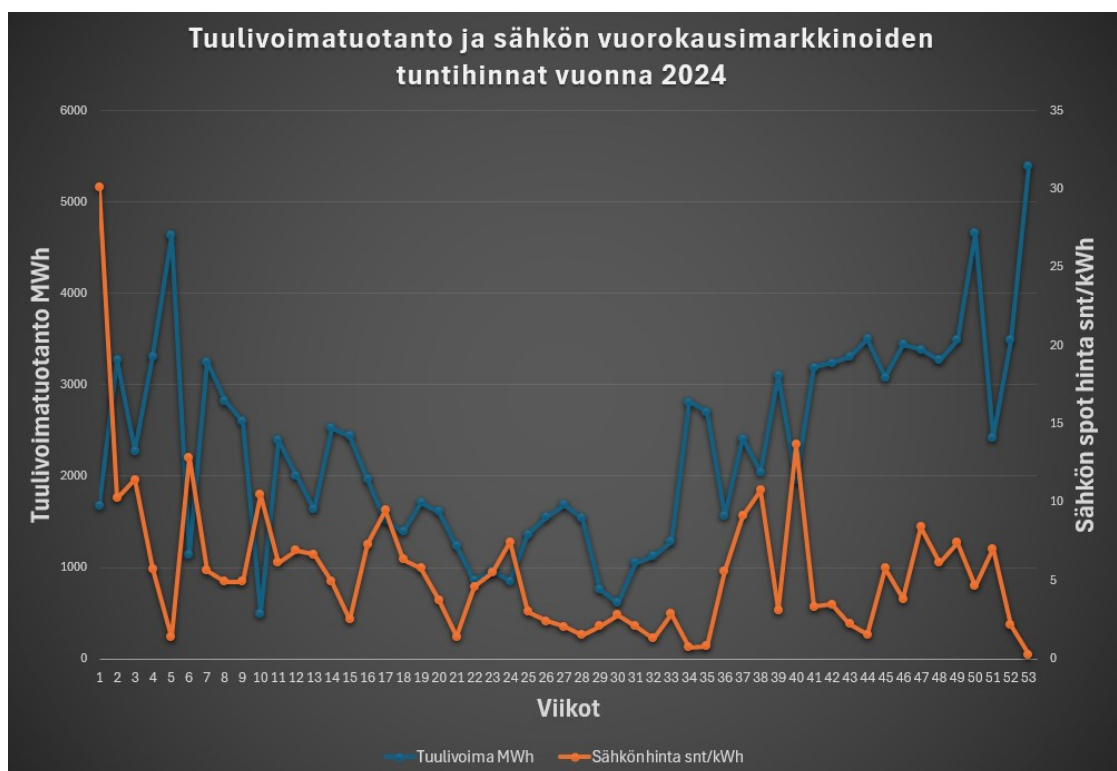
Ääritapausten vertailemiseksi käytettiin yksinkertaista äärimmäisten arvojen vertailua. Siinä tarkasteltiin tuulivoiman tuotannon korkeimpia ja matalimpia tuntikohtaisia arvoja suhteessa sähkömarkkinoiden vuorokausihintojen vastaaviin arvoihin. Tämä lähestymistapa täydentää SARIMAX-mallia, joka pyrkii poistamaan muiden ulkoisten tekijöiden vaikutuksia. Tämän seurauksena yksittäiset hinnan piikit saattavat mallissa tasoittua, joten erillinen ääripäiden tarkastelu on tarpeellinen.

Lopuksi SARIMAX-mallia käytettiin simuloimaan vuotta 2026. Tämä toteutettiin lisäämällä ennustettu tuulivoimatuotannon kasvu vuoden 2024 tuotantodataan. Simulointi suoritettiin uudelleen, ja mallin tuottamaa vaikutuksen suuruutta verrattiin vuoden 2024 mallinnettuun tulokseen.

5 Tulokset

5.1 Tuulivoiman vaikutus vuorokausimarkkinoiden tuntihintoihin vuonna 2024

Kuva 6. Havainnollistaa tuulivoiman tuotannon ja tuntihinnan välistä yhteyttä. Jo pelkästään kaaviosta voidaan havaita tietynlaista korrelaatiota, mutta SARIMAX-malli tarjoaa tarkempaa ja tilastollisesti perusteltua analyysia, mikä mahdollistaa luotettavampien johtopäätösten tekemisen.



Kuva 6. Tuulivoimantuotannon ja sähkön vuorokausimarkkinoiden tuntihinnat vuonna 2024

SARIMAX-malli, johon sisällytettiin tuulivoimatuotannon viiveet sekä vuorokausittainen kausivaihtelu, saavutti keskimääräiseksi absoluuttiseksi virheeksi (MAE) 34,93 €/MWh ja neliölliseksi keskimääräiseksi virheeksi (RMSE) 68,09 €/MWh. Vertailun vuoksi yksinkertainen naiivi malli, joka olettaa sähkön hinnan seuraavan edellisen vuorokauden tuntihintaa, tuotti selvästi suuremmat virheet (MAE: 51,55 €/MWh, RMSE: 91,30 €/MWh). SARIMAX-malli

siis paransi ennustustarkkuuttaan noin 32 % MAE:n ja 25 % RMSE:n osalta verrattuna perusmalliin.

Tulokset osoittavat, että tuulivoimatuotannon ja kausivaihtelun huomioiminen selittää sähkön hinnan vaihtelua merkittävästi paremmin kuin pelkkä aikaviiveisiin perustuva ennuste. Vaikka ennustevirheet ovat yhä melko suuria suhteessa sähkön keskimääräiseen hintatasoon, ne ovat linjassa sähkömarkkinoiden tunnetun epävakauden kanssa. Mallin selvästi parempi suorituskyky verrattuna naiiviin ennusteeseen kertoo siitä, että SARIMAX soveltuu hyvin analysoimaan tuulivoiman vaikutusta tuntihintoihin Suomen sähkömarkkinoilla.

SARIMAX-malli sai arvot $(1,1,0) * (1,0,1)_{24}$, jonka mukaan saatiin seuraavat tulokset tuulivoiman tuotannon vaikutuksesta sähköpörssin vuorokausimarkkinoiden tuntihintoihin. Liitteessä 2 voidaan nähdä myös muiden mallinuksien arvojen kanssa saatuja tuloksia, mutta ne ovat linjassa tämän esimerkin kanssa, josta johtopäätökset ja tulokset ovat tehty. Tuulen määrä alentaa sähköpörssin markkinahintoja välittömästi ja pienellä viiveellä. Määrällisesti malli arvioi tuulivoiman alentavan Suomen päivätason sähkömarkkinahintoja noin $-21,83 \text{ €/MWh}$ vuonna 2024. Tulos saadaan SARIMAX-mallinnoksesta, joka antaa tuulelle seuraavat kolme parametria:

- β_1 (Wind) = $-0,006593 \text{ €/MWh per MWh}$
- β_2 (Wind_lag1) = $-0,004009 \text{ €/MWh per MWh}$
- β_3 (Wind_lag24) = $+0,000945 \text{ €/MWh per MWh}$

Kun huomioidaan tuntikohtainen keskiarvo n. 2259 MWh tuulivoimaa kullakin hetkellä ja vastaavat viiveet kaikkien kolmen vaikutuksen summa on keskimäärin noin $-21,83 \text{ €/MWh}$. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi 100 MWh tuntikohtaista tuulivoimatuotantoa johtaa noin $2,18 \text{ €/MWh}$ hinta-alennuksen, mutta tarkasteltuna kokonaisuuteen. Vuotuisesti tämän luvun vertailu kulutettuun energiaan ($82,7 \text{ TWh}$) vastaa noin 350 miljoonan euron säästöä vuoden 2024 sähkön tuntihinnassa ilman arvonlisäveroa tai 434 miljoonaan

euron säästöä arvonlisäverolla. Tämä vastaa kirjallisuudessa aika tarkasti IEA:n tutkimustulosta (IEA, 2023), jossa he löysivät vaikutuksen olevan ilman arvonlisäveroa noin 318 miljoonaa euroa. Kyseinen tulos on muunnos IEA:n vuoden 2023 raportin datasta.

Vertailun vuoksi katsoin myös muita kansainvälisiä ja Suomen alueellisia tutkimuksia, joissa havainnointiin tuulivoiman lisääntyessä markkinahinnan kehittyvän tuntikohtaisesti usein noin 5–15 €/MWh verran alaspäin, riippuen tuuliasenteiden ja muiden tuotantomuotojen vuorovaikutuksesta. Mitä korkeammaksi tuulivoiman osuus kasvaa, sitä vahvemmin tuuli painaa hintoja alaspäin erityisesti matalien kuormitustuntien aikana.

Työn tulos eli $-21,83$ €/MWh suuruinen keskimääräinen alennus on siis verrattain suuri, mutta ei täysin poikkeava. Tulos sisältää arvonlisäveron ja ilman sitä se olisi noin $-17,6$ €/MWh. Arvonlisäveron lisäksi rajallinen tutkimus ei ota huomioon muita vaikuttavia tekijöitä, kuin tuulen ja sen hinnan ja näin ollen voi antaa väärän kuvan tuulivoiman oikeasta vaikutuksesta, vaikka SARIMAX-malli pyrkiikin tätä vaikutusta minimoimaan. Myös vuoden 2024 data jakso ei pysty ottamaan huomioon pidempiaikaisia tapahtumia sähköntuotannossa. Asiat kuten vesivoiman historiallisen matalat säilöntä ja niin ollen tuotantomäärät nostavat tuulivoiman merkitystä verrattuna keskimääräiseen vuoteen. Näin ollen tätä tutkimusta ei ole tilastollisesti mahdollista käyttää tulevaisuuden hintojen ennustamiseen ilman jatkotutkimusta muiden vaikuttavien tekijöiden, kuten kaasunhinnan, vesivoiman, kysynnän ja lämpötilan mallintamista.

Tuulivoiman suurta vaikutusta selittää vuorokausimarkkinoiden toimintatapa, jossa sähköä ostetaan tuotantomuodon hinnan perusteella siten, että halvin tuotantomuoto hyväksytään ensin. Koska tuulivoima on usein halvin sähköntuotantomuoto, se syrjäyttää kalliimpia tuotantotapoja ja laskee siten markkinahintoja. Vastaavasti, kun tuulivoiman tuotanto on vähäistä, sähkön keskihinta nousee huomattavasti, koska koko kysyntä joudutaan kattamaan muilla kalliimmilla tuotantomuodoilla. Hintaan vaikuttavat kuitenkin monet

muutkin tekijät, jotka voivat tilapäisesti tai pysyvästi muuttaa markkinatilannetta riippuen niiden voimakkuudesta.

Äärimmäisten tapahtumien yhteyksien analyysi taulukossa 1. osoittaa, että tuulivoiman tuotannon sijoittuminen alimman tai ylimmän 20 %:n joukkoon on heikosti, mutta kuitenkin tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä tuntihinnan sijoittumiseen alimman tai ylimmän 20 %:n joukkoon kaikista datan tuntihinnoista. Kun tarkastellaan vieläkin äärimmäisempiä arvoja (esimerkiksi 10 % tai 5 %), korrelaation havaitaan pienenevän. Tämä johtunee otannan pientymisestä. Tässä työssä keskitytään 20 %:n luokkaan, jotta saadaan käyttöön riittävän suuri otanta.

Kun analysoidaan molempien ääripäiden tuloksia samanaikaisesti, huomataan, että tulokset ovat keskenään hyvin samanlaisia, ja ne voidaan siksi yhdistää. Mikäli ilmiöt olisivat toisistaan riippumattomia, odotusarvo yhteistoteutumalle olisi 4 %. Todellinen havaintoarvo on kuitenkin 7,7 %. Prosentuaalisesti oletettaisiin, että joka viides (20 %) matalan hinnan tunti osuisi korkean tuulituotannon tunneille, mutta todellisuudessa näin käy noin 38 %:ssa tapauksista. Sama suhde pätee myös muilla yhdistelmillä. Voidaan siis tilastollisesti varmuudella todeta, että tuulivoiman tuotannolla on merkittävä vaikutus sähkömarkkinoiden hintavaihteluun eli volatiliisuuteen. Voidaan siis tilastollisesti varmuudella todeta, että tuulivoiman tuotanto on yhteydessä sähkömarkkinoiden hintavaihteluun eli volatiliisuuteen.

Taulukko 1. Äärimmäisten tapahtumien analyysi

Analyysi	Tuuli	hinta	Tuntimä ära	% äärimmäisiä tapahtumia	Korrela atio kerroin	p-arvo
Matala tuuli ja korkeahinta	Alin 20%	Ylin 20%	680	7.7 %	0.234	<0.001
Korkeatuuli ja matalahinta	Ylin 20%	Alin 20%	674	7.7 %	0.233	<0.001
Matala tuuli ja korkeahinta	Alin 10%	Ylin 10%	219	6.1 %	0.166	<0.001
Korkeatuuli ja matalahinta	Ylin 10%	Alin 10%	43	4.9 %	-0.029	0.009
Matala tuuli ja korkeahinta	Alin 5%	Ylin 5%	61	13.9 %	0.093	<0.001
Korkeatuuli ja matalahinta	Ylin 5%	Alin 5%	6	1.4 %	-0.036	0.001

5.2 Syöttötariffien vaikutus vuorokausimarkkinoiden tuntihintoihin

Vuonna 2024 syöttötariffeja maksettiin yhteensä 161 miljoonaa euroa, ja tukea sai 116 eri voimalaitosta. Nämä luvut ovat linjassa Energiaviraston julkaiseman datan kanssa (Energivirasto 2, 2024). Tulevaisuudessa syöttötariffien vaikutuksen tuntihintoihin voidaan olettaa vähenevän, sillä 12-vuotiset tukisopimukset ovat päättymässä kiihtyvällä tahdilla 2020-luvun aikana. Samalla markkinaehtoisien tuulivoimatuotannon kasvu pienentää niiden voimaloiden osuutta, jotka edelleen hyötyvät syöttötariffeista.

5.3 Tuulivoiman vaikutus sähköpörssiin tulevaisuudessa

Tulevaisuudessa tuulivoiman tuotannon kasvaessa voidaan olettaa sen vaikuttavan entistä vahvemmin tuntihintoihin. Vertaamalla vuoden 2026 oletettua tuotantoa (28 TWh) samaan SARIMAX-malliin, jolla vuoden 2024 dataa analysoitiin, havaitaan suuremman tuulimäärän vaikuttavan hintoihin noin 2,3-kertaisella voimakkuudella. Tämä analyysi ei mahdollista tarkkojen hintojen ennustamista vuodelle 2026 tai sitä pidemmälle, mutta on selvää, että tuulivoiman vaikutus hintoihin kasvaa tuotannon kasvaessa.

Voidaan siis olettaa vuoden 2024 trendien jatkuvan tulevaisuudessa, mikäli ulkoiset tekijät pysyvät ennallaan. Näihin trendeihin sisältyy hintojen laskua sekä mahdollisesti lisääntyvä määrä äärimmäisiä hintatapahtumia. On kuitenkin tärkeää huomata, että kyseessä on arvio, joka perustuu useisiin oletuksiin ja on siten vain suuntaa antava. Tulevaisuuden tarkka mallintaminen on erittäin haastavaa, ja tämän työn osalta ei ole analysoitu riittävästi muuttujia, jotta tuloksia voitaisiin pitää tilastollisesti merkitsevinä. SARIMAX-malli pyrkii minimoimaan muiden muuttujien vaikutuksen tulokseen, mutta ei korvaa näiden muuttujien mallintamista.

6 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka tuulivoiman tuotanto on yhteydessä Suomen sähköpörssin vuorokausimarkkinoiden hintoihin. Työssä hyödynnettiin SARIMAX-aikasarjamallia, joka mahdollistaa monimutkaisten, ajassa vaihtelevien riippuvuuksien tarkastelun muuttujien välillä. Lisäksi tarkasteltiin ääritilanteita tuulivoiman ja tuntihintojen yhteydessä, sekä arvioitiin syöttötariffijärjestelmän vaikutusta. Analyysin perusteella voidaan tehdä useita johtopäätöksiä, jotka tukevat työn alkuperäisiä hypoteeseja.

Ensinnäkin tulokset osoittavat, että tuulivoiman tuotannolla on merkittävä vaikutus sähköpörssin tuntihintoihin. SARIMAX-mallinnuksen mukaan tuulivoiman tuotanto alensi keskimääräisiä vuorokausimarkkinoiden tuntihintoja Suomessa noin $-21,83 \text{ €/MWh}$ vuoden 2024 datalla. Malli pienensi keskimääräistä virhettä noin 32 % verrattuna yksinkertaiseen keskiarvomalliin. Tämä tarkoittaa, että mallilla voidaan tilastollisesti merkitsevällä tavalla todeta tuulivoiman painavan markkinahintoja alas. Tulos tukee markkinamekanismia, jossa halvin tuotantomuoto hyväksytään ensin vuorokausimarkkinoilla, ja koska tuulivoima on käytännössä tuotantokustannuksiltaan nollassa, se syrjäyttää kalliimpia tuotantomuotoja ja laskee keskihintaa.

Toiseksi, tarkasteltaessa ääripäitä, eli tunteja, jolloin tuulivoiman tuotanto on erityisen korkea tai matala havaittiin, että näinä hetkinä tuntihinnat poikkeavat merkittävästi keskiarvosta. Erityisesti tuulisimpina hetkinä tuntihinnat painuivat todennäköisemmin alemmas ja vastaavasti tuulettomina hetkinä hinnat nousivat herkemmin korkealle. Tämä ilmiö havaittiin todennäköisyyksien vertaamisessa ja vahvistettiin yksinkertaisella ääripäiden jakaumalla. Vaikka chi-square-testi ei löytänyt tilastollisesti merkittävää riippuvuutta, voidaan aineistosta visuaalisesti ja suhteellisesti nähdä selkeä trendi, joka vahvistaa SARIMAX-mallin havaintoja.

Kolmanneksi voidaan todeta, että syöttötariffijärjestelmällä oli keskeinen rooli tuulivoiman kasvussa Suomessa. Vuonna 2024 syöttötariffeja maksettiin vielä 116 laitokselle noin 161 miljoonan euron edestä. Järjestelmä on kuitenkin

poistumassa käytöstä vuoden 2030 mennessä, mikä vähentää sen suoraa vaikutusta tulevaisuuden hintarakenteeseen. Jatkuvasti kasvava määrä markkinaehtoisesti rakennettua tuulivoimaa muuttaa sähkön tarjontarakennetta ja vähentää hintatuen vaikutusta, mutta samalla lisää kokonaistarjontaa markkinoilla.

Neljänneksi, SARIMAX-mallin avulla tehty vuoden 2026 tuotannon simulaatio osoitti, että suurempi tuulivoiman tuotanto voi lisätä vaikutusta tuntihintoihin jopa 2,3-kertaiseksi vuoden 2024 tilanteeseen verrattuna. Tämä tarkoittaa, että jos tuotanto kasvaa arvioituun 28 TWh tasoon, tuulivoiman vaikutus markkinahintoihin tulee entisestään voimistumaan. Vaikka tämä ei ole varsinainen ennuste, vaan suuntaa-antava simulaatio, se osoittaa selvästi trendin: tuulivoiman kasvu tuo mukanaan merkittävämpää vaikutusta vuorokausimarkkiniden tuntihintoihin.

Kuitenkin työn rajoitteet on tunnustettava. SARIMAX-mallin vahvuus on sen kyky huomioida aikaulotteisia riippuvuuksia, mutta se ei mallinna kaikkia mahdollisia muuttujia, kuten kulutushuippuja, ulkomaankauppaa tai siirtokapasiteetin rajoituksia. Näiden tekijöiden mallintaminen vaatisi laajempaa aineistoa ja mahdollisesti myös muita malleja. Tämän työn tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä, mutta rajoittuvat niihin muuttujiin, jotka mallissa on otettu huomioon.

Myös geopoliittinen tilanne, erityisesti koronaviruspandemian ja Ukrainan sodan jälkeiset vuodet on tehnyt datasta tavallista volatiilimpaa. Näin ollen työn tuloksia tulisi tarkastella kriittisesti ja nähdä ne osana laajempaa kokonaisuutta. On perusteltua ehdottaa, että vastaava tutkimus toistetaan 3–5 vuoden kuluttua, kun tilanne on mahdollisesti vakiintunut ja markkinat palautuneet normaalimpaan toimintamalliin.

Jatkossa tutkimusta voitaisiin kehittää lisäämällä siihen useampia muuttujia ja vertaamalla Suomen tilannetta muihin maihin, erityisesti niihin, joissa tuulivoiman osuus sähköntuotannosta on jo korkea. Näin saataisiin tarkempi

kuva siitä, kuinka yleispäteviä tämän työn havainnot ovat ja kuinka paljon paikalliset markkinaolosuhteet vaikuttavat lopputulokseen.

Lopuksi voidaan todeta, että tämä työ osoittaa selvästi tuulivoiman merkityksen sähkömarkkinoilla: se laskee keskihintoja ja on yhteydessä tuntihintojen vaihteluun. Näin ollen tuulivoiman tuotannon kasvun voidaan nähdä hyödyttävän kuluttajia ja tukevan siirtymää kohti vihreämpää energiatuotantoa, mutta samalla se asettaa paineita markkinoiden kehittämiseen, kuten säätövoiman ja varastointiteknologioiden lisäämiseen.

Lähteet

European Energy Exchange, 2024. Nordic Power Markets. Viitattu 6.6.2025
Saatavilla: <https://www.eex.com/en/markets/power/nordic-power-markets>

Energiateollisuus 1, 2024. Sähkötöimintöiden toiminta. Viitattu 15.5.2025
Saatavilla: <https://energia.fi/energiapolitiikka/ajankohtaista-sahkomarkkinoista/sahkomarkkinoiden-toiminta>

Energiateollisuus 2, 2024. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:
<https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-tuntidata/>
<https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-tuntidata/>

Energiavirasto 1, 2024. Tuotantotuki. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:
<https://energiavirasto.fi/tuotantotuki>

Energiavirasto 2, 2024. Tuotantotuki. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:
<https://tuotantotuki.emvi.fi/Installations>

Energy Plaza / Vattenfall, 2024. Näin toimivat sähkötöimintöiden markkinat Suomessa.
Viitattu 15.5.2025. Saatavilla: <https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/nain-toimivat-sahkomarkkinat-suomessa>

entsoe 2024, Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:
<https://newtransparency.entsoe.eu/?appState=%7B%22sa%22%3A%5B%5D%2C%22st%22%3A%22BZN%22%2C%22mm%22%3Atrue%2C%22ma%22%3Afalse%2C%22sp%22%3A%22CLOSED%22%2C%22dt%22%3Anull%2C%22df%22%3Anull%2C%22tz%22%3A%22CET%22%7D>

eSett, 2024. NBS käsikirja. Viitattu versioon 5.1, 16/05/2025. Saatavilla:
<https://www.esett.com/handbook/> viitattu versioon 5.1, 16/05/2025.

Fingrid 1. Miten sähkötöimintöiden hinta muodostuu? Viitattu 16.05.2025 Saatavilla:
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu/>

Fingrid 2, 2024. yleistietao-sahkomarkkinoista. Viitattu 16/05/2025. Saatavilla:
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietao-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu/>

Fingrid 3, 2024. Yleistietao sähkömarkkinoista. Viitattu 15.5.2025. Saatavilla:
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietao-sahkomarkkinoista>

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/1/>

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/2/>

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/3/>

IEA, 2023. Report 23 Finland. Viitattu 15.5.2025 https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2024/11/Finland_2023.pdf

Motiva 1, 2024. Tuulivoimateknologia. Viitattu 15.5.2025
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomesa/tuulivoimateknologia

Nurmio; Pakarinen Suomen ympäristökeskuksen raporteja; 10/2024. Viitattu 15.5.2025

Palma, W. 2016, Time Series Analysis, John Wiley & Sons. Viitattu 15.5.2025

Seabold, S. and Perktold, J. 2010, statsmodels: Econometric and statistical modeling with python, in '9th Python in Science Conference'. Viitattu 15.5.2025

Sergei Kulakov, Florian Ziel, 2019. The Impact of Renewable Energy Forecasts on Intraday Electricity Prices. Viitattu 15.5.2025. Saatavilla:
<https://arxiv.org/abs/1903.09641>

Suomenuusiutuvat 1, n.d. Miksi tuulivoimaa. Viitattu 15.5.2025. Saatavilla:
<https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/miksi-tuulivoimaa/>

Suomenuusiutuvat 2, n.d. Tuulivoima Suomessa. Viitattu 15.5.2025. Saatavilla:
<https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoima-maailmalla/tuulivoima-suomessa/>

Suomenuusiutuvat 3 n.d. Mikä PPA? Viitattu 15.5.2025. Saatavilla:
<https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset/>

Suomenuusiutuvat 4 n.d. Yleistä merituulivoimasta. Viitattu 15.5.2025.
Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/merituulivoima/>

Suomenuusiutuvat 5 n.d. 30 % tuulivoimaa 2030 – mitä se tarkoittaa kansantaloudelle? Viitattu 15.5.2025. Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/30-tuulivoimaa-2030-mita-se-tarκοittaa-kansantaloudelle/>

Suomenuusiutuvat 6 n.d. Hankkeet ja voimalat Suomessa. Viitattu 15.5.2025.
Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/hankkeet-ja-voimalat-suomessa/>

Suomenuusiutuvat vuosiraportit 2015–2024. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/3/>

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/2/>

<https://suomenuusiutuvat.fi/kategoria/tilastot/page/1/>

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024. Sähkömarkkinat. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:
<https://tem.fi/sahkomarkkinat>

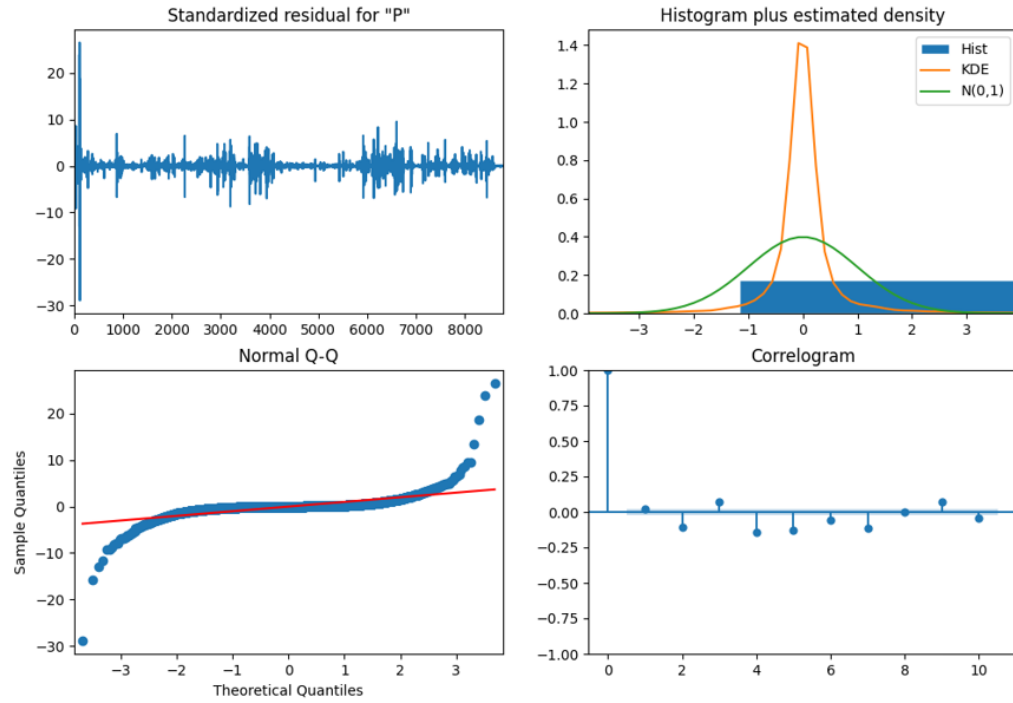
VTT vuosiraportit 1999–2014. Viitattu 15.5.2025 Saatavilla:

<https://cris.vtt.fi/en/publications/?search=tuulivoiman+tuotantotilastot&originalSearch=tuulivoiman+tuotantotilastot&pageSize=50&ordering=rating&descending=true&showAdvanced=false&allConcepts=true&inferConcepts=true&searchBy=PartOfNameOrTitle>

Huomautus

Tämän opinnäytetyön kielellisen tarkistuksen tukena on hyödynnetty ChatGPT-tekoälysovellusta (OpenAI, 2025). Sovellusta on käytetty vain tekstin kielenhuoltoon ja muotoiluun, ei sisällön tuottamiseen.

Liitteet



Liite 1. SARIMAX-mallinnuksen jäännösdiaagnostiikka.

Malli	Parametri	Kerroin	p-arvo	95 % LV - ala	95 % LV - ylä	MAE (€/MWh)	RMSE (€/MWh)
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	Wind	-0.0061	0.0291	-0.0116	-0.0006	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	Wind_lag1	-0.0036	0.1458	-0.0085	0.0013	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	Wind_lag24	0.0015	0.4174	-0.0022	0.0053	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	ar.L1	0.1637	0.0	0.1595	0.1678	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	ar.S.L24	0.891	0.0	0.8859	0.896	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	ma.S.L24	-0.826	0.0	-0.836	-0.816	34.9342	68.0902
ARIMA(1,1,0)(1,0,1)[24	sigma2	904.3987	0.0	897.1222	911.6753	34.9342	68.0902
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	Wind	-0.0064	0.0289	-0.0122	-0.0007	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	Wind_lag1	-0.0038	0.1426	-0.0088	0.0013	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	Wind_lag24	0.0017	0.3603	-0.002	0.0054	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	ar.L1	-0.436	0.0	-0.4571	-0.4149	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	ar.L2	-0.0076	0.0017	-0.0124	-0.0029	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	ma.L1	0.6396	0.0	0.619	0.6603	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	ar.S.L24	0.8959	0.0	0.8907	0.9011	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	ma.S.L24	-0.83	0.0	-0.8404	-0.8195	34.7775	67.1621
ARIMA(2,1,1)(1,0,1)[24	sigma2	892.0971	0.0	884.5978	899.5964	34.7775	67.1621
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	Wind	-0.0076	0.0026	-0.0126	-0.0027	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	Wind_lag1	-0.0056	0.0315	-0.0107	-0.0005	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	Wind_lag24	0.0007	0.6785	-0.0025	0.0038	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	ar.L1	0.9258	0.0	0.9244	0.9272	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	ma.L1	-1.001	0.0	-1.0024	-0.9995	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	ma.S.L24	-0.9142	0.0	-0.922	-0.9065	45.7967	63.0897
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24	sigma2	927.4439	0.0	920.2009	934.6868	45.7967	63.0897

Liite 2. Taulukko sisältää kolmen SARIMAX-mallin parametrien tilastollisen tarkastelun ja ennustetarkkuuden vertailun.