
Olkiluoto 3:n koekäytön vaikutuksesta pörssisähkön hintaan Suomessa

Sami Kohvakka
Väre Oy

Sähkötehoaan 1600 MW kokoinen Olkiluodon ydinvoimalan kolmas reaktori on yksi maailman kalleimmista rakennuksista sekä Euroopan suurimmista sähköntuottajista. Tutkimme tässä kuinka sen käyttöönotto on vaikuttanut pörssisähkön hintaan Suomessa.

1 Johdanto

Olkiluodon ydinvoimalaitos on Suomen suurin sähköntuottaja, joka omistaa Teollisuuden Voima Oyj (TVO). Laitoksella on kaksi kiehutusvesireaktoria, jotka tuottavat yhteensä noin 15 terawattituntia sähköä vuodessa. Vuonna 2023 laitokselle on tarkoitus valmistua kolmas reaktori, joka on EPR-tyyppinen painevesireaktori ja sähkötehoaan 1600 megawattia¹. Tämä lisää Suomen tuotantokapasiteettia jopa 15 prosentilla ja vähentää maan riippuvuutta tuontisähköstä². Olkiluodon kolmas reaktori on ollut pitkään rakenteilla ja sen valmistuminen on viivästynyt useita kertoja erilaisten teknisten ongelmien ja riitojen takia³. Olkiluodon kolmas reaktori on yksi maailman ensimmäisistä EPR-tyyppisistä voimaloista ja sen odotetaan olevan turvallinen ja tehokas tapa tuottaa päästötöntä energiaa Suomelle.

Selvitimme Olkiluoto 3:n koekäytön vaikutusta sähkön hintaan Suomessa regressiomallien avulla. Olkiluodon ydinvoimalan 3. reaktori käynnistettiin joulukuussa 2021 ja se alkoi tuot-

taa sähköä maaliskuussa 2022.

Sähkön hinta muodostuu kolmesta osasta: sähkön verkkopalvelun hinnasta, sähköenergian hinnasta ja veroista. Tässä keskitytään sähköenergian verottomiin tuntihintoihin Suomessa. Nämä hinnat ovat suositetaan kasvattaneiden pörssisähkösopimusten perustana, tosin niiden päälle tulee vielä marginaali ja verot.

Hinta määräytyy kullekin tunnille Nord Pool -sähköpörssissä. Sähköpörssi yhdistää seuraavan päivän tuotantoennusteet, kulutusennusteet ja käytettävissä olevat rajasiirtokapasiteetit ja laskee niiden pohjalta tasapainohinnan jokaiselle hinta-alueelle. Suomi muodostaa yhden hinta-alueen, mutta Ruotsissa ja Norjassa niitä on useita. Suomen kannalta näistä Ruotsin hinta-alueista tärkeimmät ovat SE3 ja SE1, sillä Suomesta menee siirtoyhteydet näille alueille. Suomesta menee siirtoyhteydet myös Viroon ja Venäjälle, mutta Venäjän siirto on ollut tauolla toukokuusta 2022 alkaen.

Mallissamme sähkön tuntihintaa selitettiin käyttäen hiilen ja kaasun johdannaishintoja, päästöoikeuden hintaa, seuraavan päivän tuulituotantoennustetta, Olkiluoto 3:n tuotantotehoa, lämpötilaa Tampereella, altaisiin

1. <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol1jaol2/rakennejateknisetiedot.html>

2. <https://www.is.fi/taloussanommat/art-2000008460073.html>

3. <https://www.iltalehti.fi/kotimaa/a/7d160cce-62cd-4eff-8107-9241a9515664>

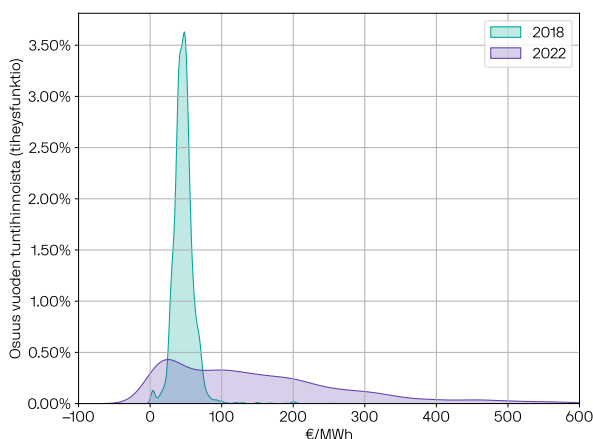
varastoitunutta vesivoiman tuotantokapasiteettia (ns. hydrobalanssi) ja Suomen ja naapurimaiden väliset rajat ylittäviä sähkönsiirtoja. Lisäksi huomioimme vuorokauden ajasta, viikonpäivästä ja lomapäivistä aiheutuvat vaihtelut sähkön kysynnässä ja tuotannossa.

Aineisto on koottu käyttäen tietoja vuosilta 2016-2023, joten se antaa kattavan kuvan sähkömarkkinoiden kehityksestä viime vuosina Suomessa. Yksittäiset puuttuvat arvot täydennettiin aineistoon käyttäen edellisen tunnin arvoa.

1.1 Sähkön hinnan kehitys

Kuvassa 1 on otettu esimerkkivuosiksi 2018 ja 2022 ja piirretty tuntihintojen jakaumat näille vuosille. Vuosi 2018 edustaa niin sanottua vanhaa normaalia, siis aikaa ennen pandemiaa, Ukrainan sotaa ja energiakriisiä. Lähes kaikki vaihtelu tapahtui välillä 0-100 €/kWh. Huippuhintojen yleistymisestä huolimatta vuoden 2022 aineistossa moodi on itseasiassa matalampi kuin vuoden 2018 aineistossa sekä miinushintaisten tuntien osuus on kasvanut. Sähkön hinnan vaihteluväli on kuitenkin kasvanut valtavasti mikä vaikeuttaa sähköyhtiöiden riskienhallintaa.

Kuva 1: Sähkön verottomien tuntihintojen jakauma vuosina 2018 ja 2022



Sama ilmiö on havaittavissa kuvasta 2, jossa on piirretty pidempi aikasarja sähkön tuntihinnan kehityksestä aikavälillä 2016-2023. Kuvassa 3 on

esitetty sama sarja tasoitettuna 30 päivän liukuva keskiarvoa käyttäen. Siitä huomataan miten sähkön tuntihintojen keskiarvo ja keskihajonta alkoivat kasvaa voimakkaasti loppuvuodesta 2021. Jälkikäteen tarkasteltuna tämän voidaan ajatella olevan taitekohta, jota ennen tapahtuneet havainnot eivät ole riittäviä kuvaamaan tulevaisuutta. Joulukuussa 2021 sähkön vähittäismyynti toimialana teki kymmenien ellei satojen miljoonien eurojen tappiot ja pian tuli ensimmäiset uutiset konkurssiin ajautuneista sähköyhtiöistä.

1.2 Käytetyt muuttujat

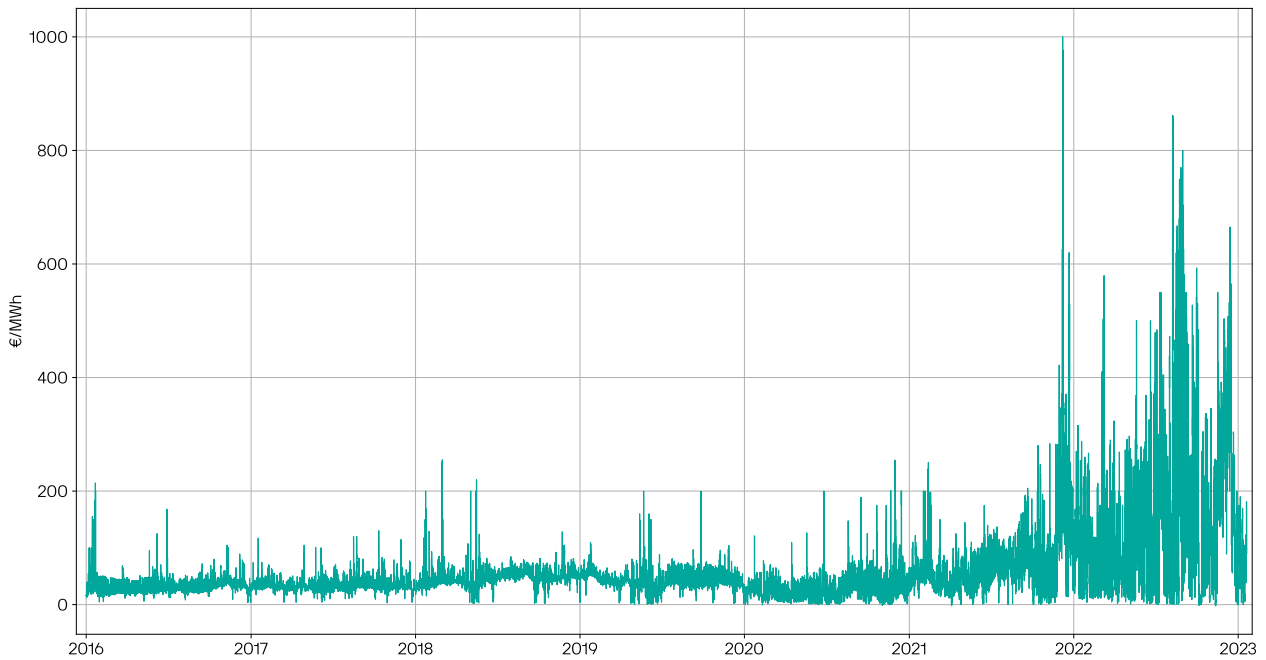
Aineisto koostuu sähkömarkkinoita kuvaavista tuntitiedoista vuosilta 2016-2023. Aineistossa on 61 827 datapistettä ja aikaleimat on ilmoitettu Suomen ajassa. Tämänkaltaisen analyysi on mahdollista, koska yhteiset eurooppalaiset sähkömarkkinoiden läpinäkyvyyssäännökset (REMIT) edellyttävät tarpeeksi isoilta markkinatoimijoilta tuotantoon vaikuttavien tekijöiden avointa raportointia. Tarkempi kuvaus käytetyistä muuttujista on annettu hieman alempana taulukossa 1.

Huomioimme energiakriisin alkua kuvaavan taitekohdan kahdella tavalla: Lisäämme koko aineistoa käyttävään malliin energiakriisistä kertovan muuttujan, joka saa arvon 1 marraskuusta 2021 alkaen. Laskemme arvo tälle muuttujalle ja sen interaktioille muiden muuttujien kanssa. Myöhemmin ajamme mallin uusiksi ilman tätä muuttujaa mutta käyttämällä vain taitekohdan jälkeistä dataa. Siten voimme tarkastella eri tekijöiden vaikutuksia sähkön hintaan vanhassa normaalissa ja energiakriisin aikana. Teemme tämän siksi, koska yksinkertainen lineaarinen regressio on tämänkaltaisessa sarjassa altis niin sanotulle heteroskedastisuusongelmalle, jossa mallin virhe on sitä suurempi mitä korkeampia arvoja malli ennustaa.

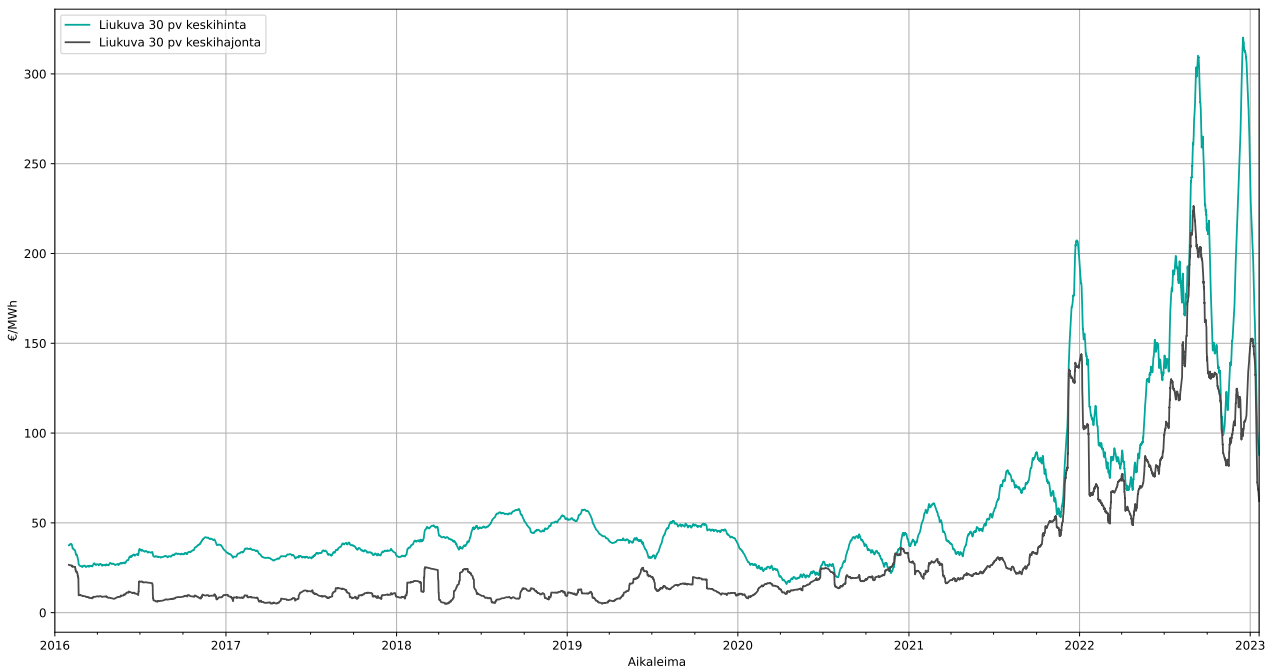
Taulukko 1: Huomiodut sähkön hintaan vaikuttavat tekijät

Muuttuja	Selite
<i>Uusiutuvat</i>	
EUR_MWh	Pörssisähkön tuntihinta Suomessa €/MWh ilman arvonnäkökulmaa ja myyjän marginaalia
DA_Tuulituotantoennuste_MW	Edellisen päivän tuulituotantoennuste kyseiselle seuraavan päivän tunnille megawatteina
Hydrobalanssi_GWh	Nordpool-alueen vesivarannot gigawattitunteina
<i>Fossiilit</i>	
Hiili_USD_t	Kivihiilen hinta Hollantiin toimitettuna seuraavalle vuosineljännekselle Yhdysvaltain dollareina per tonni euroiksi muunnettuna
Kaasuvarasto_TWh_Saksa	Saksan maakaasuvarastojen taso terawattitunteina
TTF_kaasu_FRONT1M	Maakaasun hinta seuraavan kuukauden toimitukselle euroissa per megawattitunti
EUR_CO2eqv_t	Päästöoikeuden hinta euroa per tuhat kiloa hiilidioksidiekvivalenttia
<i>Siirrot</i>	
FL_EE	Suomen ja Viron väliset rajasiirrot megawatteina
FL_RU	Suomen ja Venäjän väliset rajasiirrot megawatteina
FL_SE1	Suomen ja Pohjois-Ruotsin väliset rajasiirrot megawatteina
FL_SE3	Suomen ja Etelä-Ruotsin väliset rajasiirrot megawatteina
<i>Muut</i>	
OL3_MW	Olkiluoto 3:n tuotantoteho
DegC	Lämpötila Tampereella
vapaapäivä	Ilmoittaa, onko päivä yleinen vapaapäivä Suomessa
Tunti	Tunti
Päivä	Viikonpäivän nimi suomeksi
Kuukausi	Kuukauden nimi suomeksi
Vuosi	Vuosi

Kuva 2: Sähkön tuntihintojen kehitys Suomessa



Kuva 3: 30 vuorokauden liukuva keskiarvo ja keskihajonta sähkön verottomista tuntihinnoista

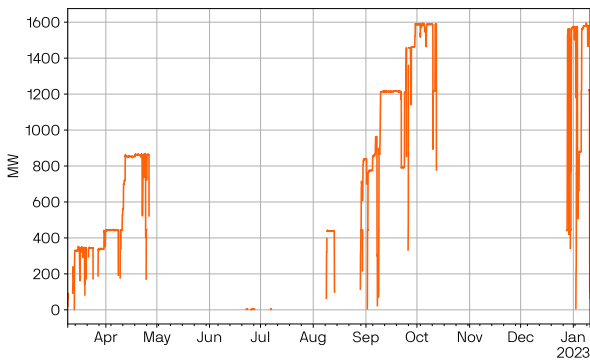


1.3 Olkiluoto 3:n koekäyttöohjelma

Koekäyttöohjelma on vaihe, jossa testataan voimalaitoksen toimintaa ja yhteensopivuutta kantaverkon kanssa. Koekäyttöohjelman aikana voimalaitos tuottaa sähköä kantaverkkoon vaihte-

levillä tehoilla. Sähköntuotanto koekäytön aikana alkoi maaliskuussa 2022. Kuvassa 4 on esitetty koekäyttöohjelman aikainen sähköntuotanto. Tuotanto alkoi ensin pienellä teholla, ja täysi 1 600 MW tuotanto saavutettiin syyskuun lopulla 2022. Koekäyttöohjelman aikana on ollut

Kuva 4: Olkiluoto 3:n koekäyttöohjelma



jaksoja, jolloin sähkön tuotantoteho on vaihdellut lyhyen ajan sisällä rajusti. Tällainen vaihtelu on normaalissa tuotantokäytössä epätavallista, joten koekäyttöohjelma tarjoaa ainutkertaisen mahdollisuuden yrittää eristää tuotannon vaikutus sähkön markkinahintaan. Koska koekäyttöohjelman aikana sähköä tuotetaan ennalta määrätyn suunnitelman mukaan markkinahinnoista välittämättä, näin saatu arvio ei välttämättä sellaisenaan vastaa täysin markkinaehtoisesti toimivan voimalaitoksen vaikutusta sähkön hintaan. Aiemman kokemuksen perusteella ydinvoimalan ajaminen hintaohjautuvasti on epätyypillistä Suomessa, joten saatua arviota voitaneen pitää kohtuullisen uskottavana.

Kuvassa 5 on esitetty Olkiluoto 3:n tuotantotehon ja sähkön tuntihintojen välinen yhteys vuonna 2022. Kuvio on muodostettu ydinestimoimalla muuttujien tiheysfunktioita Gaussin ytimellä. Kyseessä on eräänlainen tapa tasoittaa yksittäisistä datapisteistä muodostettua histogrammia. Kuvaajan perusteella on selvää, että kaikkein korkeimmilta tuntihinnoilta on vältytty silloin kun Olkiluoto 3 on ollut ajossa. OL3:n vaikutus sähkön tuntihintoihin on siis laskeva. Graafisen tarkastelun perusteella on mahdollista, että vaikutus ei ole lineaarinen vaan ensimmäiset 400 MW tuotannosta ovat hinnanmuodostuksen kannalta kriittisempiä kuin seuraavat 1 200 MW.

Mahdollisesta epälineaarisuudesta johtuen tässä olisi voinut pilkkoa tuotantotehon tehoalueisiin ja käsitellä sitä kategorisena mutta tulkinnan helpottamiseksi käsitelimme sitä kuitenkin jatkuvana muuttujana.

2 Menetelmä

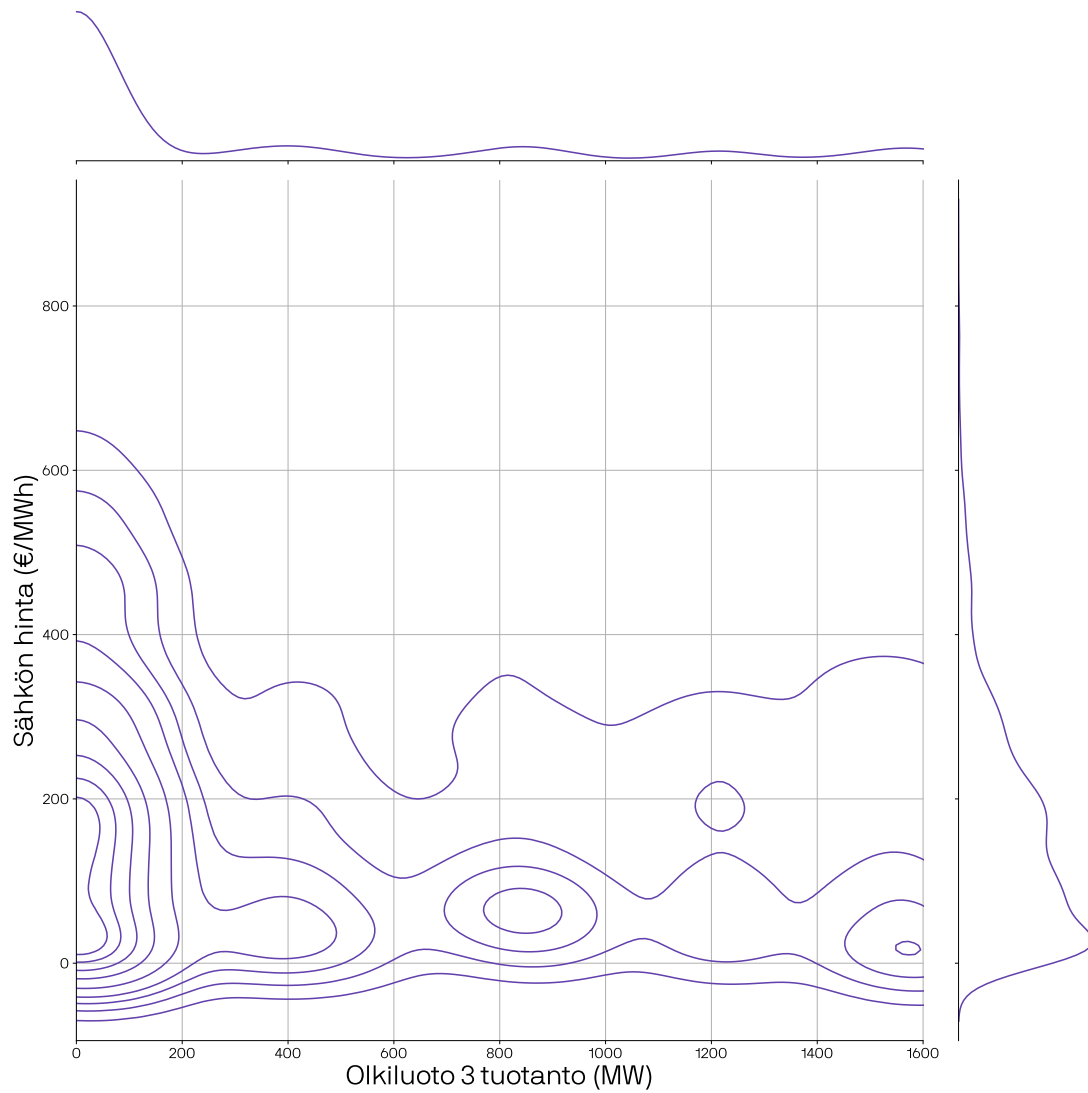
Sähkön hinta määräytyy markkinoilla kysyntään ja tarjontaan vaikuttavien tekijöiden perusteella. Hinnanmuodostusta voidaan mallintaa erilaisilla tilastollisilla menetelmillä, joista intuitiivisiin lienee lineaarinen regressio. Linearisessa regressiossa sähkön hinta esitetään riippuvana eli endogeenisena muuttujana ja sen selittämiseen käytetään riippumattomia eli eksogeenisiä muuttujia. Esimerkiksi kivihiilen hinta voisi olla yksi selittävä muuttuja. Menetelmä perustuu siihen, että riippuva muuttuja on selittävien muuttujien ja niiden kertoimien lineaarinen yhdistelmä eli tulojen summa. Summan kertoimet eli mallin parametrit määrittävät kuinka paljon kukin selittävä muuttuja vaikuttaa riippuvaan muuttujaan. Parametrit estimoidaan eli lasketaan tietokoneella niin, että saatu malli minimoi virhetermien neliösumman eli sovittuu mahdollisimman hyvin havaittuihin sähkön hintoihin.

Lineaarinen regressio on helppo ymmärtää ja toteuttaa, mutta se ei välttämättä ole kovin tarkka tai luotettava tapa mallintaa sähkön hintaa. Tyypillisesti sähkön kysyntä ja tarjonta määräytyvät alueella, jolla pienet muutokset kysynnässä tai tarjonnassa vaikuttavat vain vähän sähkön hintaan. Ääripäissä kysyntä- ja tarjontakäyrät ovat epästabiilit, jolloin pienetkin muutokset kysynnässä tai tarjonnassa voivat heilauttaa hintoja useita kymmeniä senttejä kilowattitunnilta.

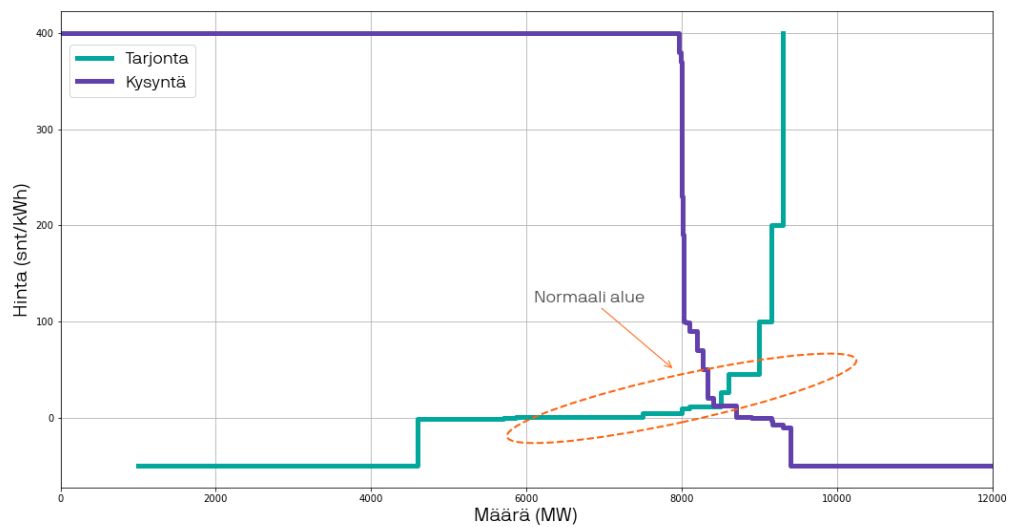
On olemassa monia muitakin menetelmiä, jotka voivat ottaa paremmin huomioon esimerkiksi sähkön hinnan aikasarjaominaisuudet, kausivaihtelun tai epälineaarisuudet. Nämä menetelmät ovat usein matemaattisesti monimutkaisempia tai perustuvat tekoälyn sovelluksiin. Niiden avulla voidaan saada parempia ennusteita sähkön hinnasta, mutta niiden toimintaperiaatteiden selittäminen kansantajuisesti on haastavaa ja toisaalta kaupallinen arvo ilmiön selittämisen näkökulmasta vähäinen.

Selittävien muuttujien jakaumat on kuvattu kuvassa 7 ja muuttujien väliset korrelaatiot kuvassa 8. Erityisen merkittävä on hiilen ja kaasun

Kuva 5: Olkiluoto 3:n sähköntuotannon ja tuntihintojen välinen yhteys



Kuva 6: Sähkön hinnan määräytyminen kysynnän ja tarjonnan leikkauspisteessä.



johdannaishintojen välinen korrelaatio. Myös fossiilisten polttoaineiden hinnat ja päästöoikeuden hinta vaikuttaisi korreloivan voimakkaasti keskenään, mutta tässä kyse taitaa olla näennäisestä riippuvuudesta. Tutkimme tätä hieman tarkemmin pääkomponenttianalyysillä, jonka mukaan hiilen ja kaasun hinta voidaan redusoida yhteen ulottuvuuteen ja päästöoikeuden toiseen. Tulkinnan selkeyden vuoksi jätimme muuttujat kuitenkin sellaisenaan aineistoon.

3 Tulokset

Perusmallin tulokset on esitetty kuvassa 9. Mallin selitysaste $R^2 = 0.796$ tarkoittaa melko hyvää sovitetta ja parametreista nähdään, että ajaessaan täydellä 1600 MW teholla OL3:n vaikutus sähkön verottomaan tukkuhintaan day-ahead markkinoilla on ollut keskimäärin $-0.0294 * 1600 = -47/MWh$ eli se on laskenut pörssisähkön kuluttajahintaa arvonlisävero huomioiden hieman yli 5 snt/kWh.

Mallin sovite on esitetty kuvassa 10 ja tasoitettuna kuvassa 11. Kuvasta 10 näkyy erityisen hyvin taitekohdan vaikutus soviteen vaihtelun kasvuun. Silmämääräisesti malli antaa liian pieniä arvoja silloin kun sähkö on todella halpaa.

Mallin huomautuksissa varoitetaan niin sanotusta multikollineaarisuusongelmasta eli siitä, että käytetyt selittäjät eivät ole toisistaan riippumattomia. Todennäköisin multikollineaarisuuden lähde lienee hiilen ja kaasun johdannaishintojen välinen voimakas korrelaatio. Tyypillisin multikollineaarisuuden seuraus on mallin parametrien keskivirheen ja tilastollisen merkittävyyden laskennan vaikeus⁴, mutta tässä se näkyy hiilen johdannaishinnan kertoimen kummallisena etumerkinä. Taustamuuttujien väliset korrelaatiot on esitetty tarkemmin kuvassa 8. Olkiluoto 3:n tuotantotehon ja muiden muuttujien välillä ei ole voimakasta korrelaatiota, joten multikollineaarisuusongelman ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi siihen efektiin josta olemme kiinnostuneita.

Muista diagnostiikkatiedoista käy ilmi, että mallin virheissä on mahdollisesti merkittäviä numee-

risia ongelmia joihin pitää ottaa kantaa. Durbin-Watson testi testaa lag-1 autokorrelaatiota eli sitä, onko kahden peräkkäisen havainnon virhe yleensä lähellä toisiaan. Tavoitearvo testissä on 2 mutta mallin antama arvo on 0,25 mikä viittaa voimakkaaseen samansuuntaiseen autokorrelaatioon. Selkeästi yli 2:n olevat arvot viittaisivat voimakkaaseen erisuuntaiseen autokorrelaatioon. Virhetermin autokorrelaatorakenne käy tarkemmin ilmi kuvan 12 korrelogrammista. Lag-1 autokorrelaation lisäksi residuaaleissa on havaittavissa 24 tunnin pituinen syklinen jakso, joka tarkoittaa käytännössä sitä että sähkön hinta 24 tuntia sitten korreloi nykyisen tuntihinnan kanssa.

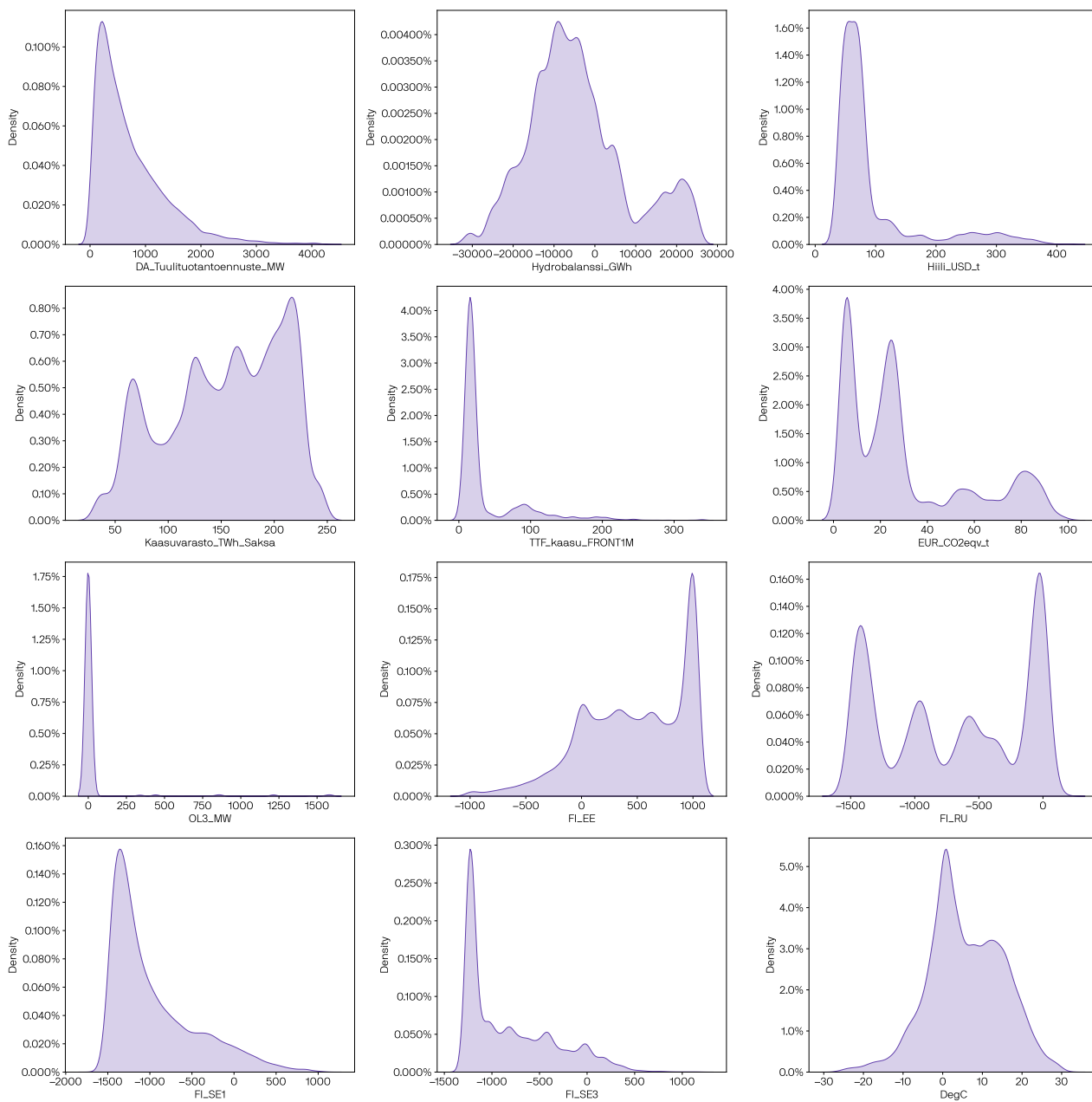
Kuvassa 13 on piirretty mallin virhe arvioitun sähkönhinnan funktiona. Silmämääräisesti kuvasta havaitaan taitekohta hieman nollan yläpuolella. Pienillä arvoilla mallin virhe on aina positiivinen, eli malli antaa toteutuneeseen nähden liian pieniä arvoja. Tulkitamme on, että halvan sähkön jaksoina ydinvoiman ja tuulivoiman hintaa laskeva yhteisvaikutus ei ole yhtä suuri kuin silloin kun vain toinen on ajossa ja sähkön hinta on korkeampi. Nollahintaiselle sähkölle löytyy siis jostain ottaja tai tuulivoiman tuotantoa ajetaan ennusteeseen verrattuna alas sähkön hinnan laskiessa lähelle nollaa. Kuva viittaa myös mahdolliseen heteroskedastisuusongelmaan, eli mallin virhe on sitä suurempi mitä korkeampia arvoja se antaa.

3.1 Perusmallin ongelmien huomioiminen

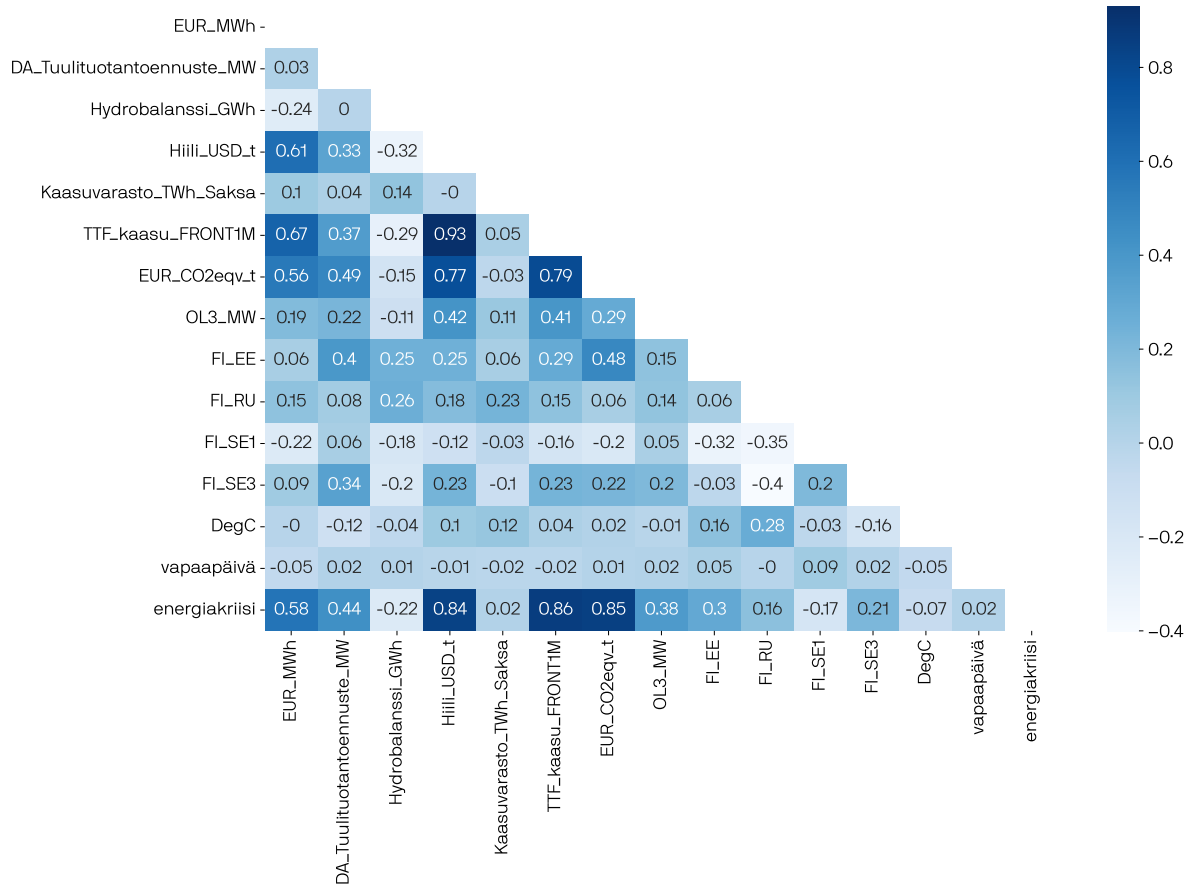
Koska edellisen päivän hintataso selvästi korreloi seuraavan päivän hintatason kanssa, teimme uuden mallin jossa on mukana edellisen päivän hintataso. Mallin selitysaste $R^2 = 0.831$ nousi hieman ja autokorrelaatio väheni. Samalla yksittäisten tekijöiden kertoimet laskivat koska osa tekijöiden vaikutuksesta sisältyy nyt edeltävän päivän tuntihintoihin. Kun malliin lisätään myös edellisen tunnin hinta mukaan päästään selityssasteeseen $R^2 = 0.954$ ja saadaan mallin virheen autokorrelaatio ja heteroskedastisuus häivytettyä pois. Tämä malli ei kuitenkaan enää kerro kovin

4. <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/multicollinearity-problem>

Kuva 7: Selittävien muuttujien jakaumat



Kuva 8: Korrelaatiot



Kuva 9: Perusmallin parametrit.

Dep. Variable:	EUR_MWh	R-squared:	0.796			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.796			
Method:	Least Squares	F-statistic:	2149.			
Date:	Tue, 07 Mar 2023	Prob (F-statistic):	0.00			
Time:	14:22:49	Log-Likelihood:	-3.0173e+05			
No. Observations:	61827	AIC:	6.037e+05			
Df Residuals:	61714	BIC:	6.047e+05			
Df Model:	112					
Covariance Type:	nonrobust					

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	-5696.881	2670.656	-8.494	0.000	-7011.369	-4382.394
C(Tunti)[T.1.0]	-1.2839	0.959	-1.338	0.181	-3.164	0.596
C(Tunti)[T.2.0]	-3.4228	0.984	-3.478	0.001	-5.352	-1.494
	:	:	:	:	:	:
DA_Tuulituotantoennuste_MW	-0.0114	0.000	-26.911	0.000	-0.012	-0.011
Hydrobalanssi_GWh	-0.0004	0.000	-19.929	0.000	-0.000	-0.000
Hiili_USD_t	-0.0228	0.022	-1.013	0.311	-0.067	0.021
Kaasuvarasto_TWh_Saksa	-0.0287	0.006	-4.938	0.000	-0.040	-0.017
TTF_kaasu_FRONT1M	0.3225	0.040	7.989	0.000	0.243	0.402
EUR_CO2eqv_t	0.3718	0.041	9.161	0.000	0.292	0.451
OL3_MW	-0.0294	0.001	-26.4610	0.000	-0.032	-0.027
FL_EE	-0.0071	0.001	-13.787	0.000	-0.008	-0.006
FI_RU	0.0024	0.000	4.771	0.000	0.001	0.003
FI_SE1	0.0015	0.000	3.509	0.000	0.001	0.002
FI_SE3	0.0044	0.000	10.414	0.000	0.004	0.005
DegC	-0.6253	0.045	-13.852	0.000	-0.714	-0.537
I(DegC ** 2)	0.0161	0.002	9.550	0.000	0.013	0.019
I(DegC ** 3)	0.0004	0.000	4.366	0.000	0.000	0.001
Vuosi	2.8462	0.333	8.549	0.000	2.194	3.499
vapaapäivä	-8.5188	0.756	-11.266	0.000	-10.001	-7.037
	:	:	:	:	:	:
energiakriisi:DA_Tuulituotantoennuste_MW	-0.0554	0.001	-76.756	0.000	-0.057	-0.054
energiakriisi:Hydrobalanssi_GWh	-0.0054	0.000	-32.625	0.000	-0.006	-0.005
energiakriisi:Hiili_USD_t	0.3283	0.028	11.863	0.000	0.274	0.383
energiakriisi:Kaasuvarasto_TWh_Saksa	0.4722	0.038	12.317	0.000	0.397	0.547
energiakriisi:TTF_kaasu_FRONT1M	0.3425	0.045	7.596	0.000	0.254	0.431
energiakriisi:EUR_CO2eqv_t	2.2572	0.087	25.819	0.000	2.086	2.429
energiakriisi:FI_EE	-0.0249	0.002	-16.488	0.000	-0.028	-0.022
energiakriisi:FI_RU	0.0729	0.002	44.865	0.000	0.070	0.076
energiakriisi:FI_SE1	0.0081	0.001	6.210	0.000	0.006	0.011
energiakriisi:FI_SE3	0.0453	0.001	48.973	0.000	0.043	0.047
energiakriisi:DegC	-5.3242	0.109	-48.850	0.000	-5.538	-5.111
energiakriisi:I(DegC ** 2)	0.0524	0.005	10.763	0.000	0.043	0.062
energiakriisi:I(DegC ** 3)	0.0025	0.000	10.787	0.000	0.002	0.003
energiakriisi:vapaapäivä	-36.3343	1.697	-21.409	0.000	-39.661	-33.008

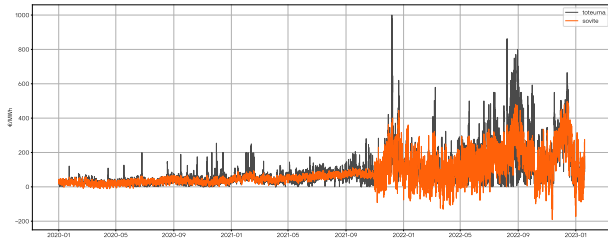
Omnibus:	36383.106	Durbin-Watson:	0.252
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	2689859.808
Skew:	2.027	Prob(JB):	0.00
Kurtosis:	35.058	Cond. No.	1.68e+17

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

[2] The smallest eigenvalue is 3.7e-22. This might indicate that there are strong multicollinearity problems or that the design matrix is singular.

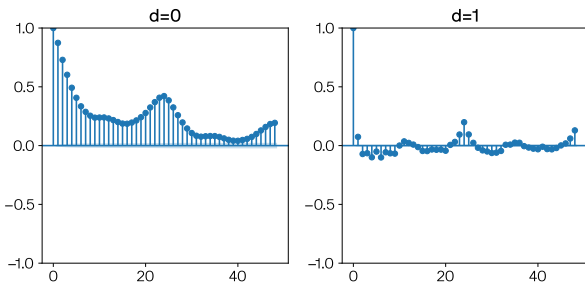
Kuva 10: Perusmallin sovite



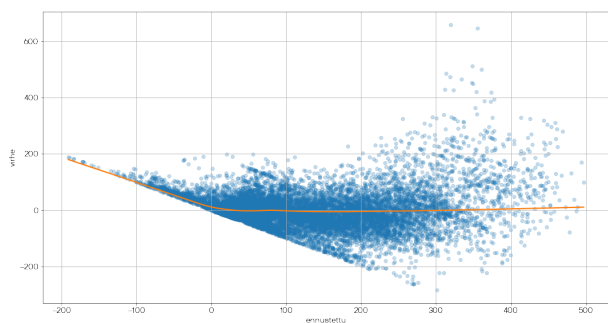
Kuva 11: 30 vuorokauden liukuvalla keskiarvolla tasoitettu perusmallin sovite



Kuva 12: Perusmallin virheiden autokorrelaatio



Kuva 13: Perusmallin virheet mallin ennustaman hintatason funktiona



hyvin miten paljon Olkiluoto 3 vaikuttaa sähkön hintaan Suomessa. Malli viittaa kuitenkin siihen, että sähkömarkkinat toimivat tehokkaasti ja valtaosa tarvittavasta informaatiosta on sisällytetty hintoihin. Kokeilemme seuraavassa kappaleessa miten rahoituksen teorian puolelta tutut aikasarjamallit soveltuisivat sähkön hinnan ennustamiseen. Myöhemmin sovitamme aineistoon vielä uuden mallin jossa on huomioitu multikollineaarisuusongelma ja korjattu ensimmäisen kertaluvun autokorrelaation vaikutus.

3.2 Pörssisähkön hinnan syklisyydestä

SARIMA-aikasarjamallit ovat tilastollisia malleja, joilla voidaan analysoida ja ennustaa aikasarjoja eli muuttujia, jotka vaihtelevat ajan funktiona. SARIMA tulee sanoista Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average. Malli koostuu neljästä osasta: kausivaihtelusta, itsekorrelaatiosta, trendistä ja liukuvasta keskiarvosta. Kausivaihtelu tarkoittaa sitä, että aikasarjassa on toistuvia kuvioita tietyin väliajoin. Itsekorrelaatio tarkoittaa sitä, että aikasarjan arvot riippuvat sen aiemmista arvoista. Integrointi tarkoittaa sitä, että aikasarjasta poistetaan trendi eli pitkän aikavälin kasvu tai lasku. Tässä yhteydessä liukuva keskiarvo tarkoittaa sitä, että aikasarjan arvot riippuvat myös aiemmasta ennustevirheestä.

SARIMA-malleissa B^S on niin sanottu backshift-operaattori, joka poimii sarjasta arvon S askelta takaapäin. Theta on polynomi, joka kuvaa liukuvan keskiarvon osaa eli aikasarjan arvojen riippuvuutta virhetermeistä. Theta voi olla sekä ei-kausinen että kausinen. Kausivaihteleva theta merkitään θ_S missä S on jakson pituus.

Delta on differenssioperaattori, joka kuvaa integroitua osaa eli aikasarjan tasoitusta. Delta voi olla sekä ei-kausinen että kausinen. Ei-kausinen delta on merkitty Δ ja kausinen delta on merkitty Δ_S , missä S kuvaa kausivaihtelevan jakson pituutta. Phi on polynomi, joka kuvaa autoregressiivista osaa eli aikasarjan arvojen riippuvuutta edellisistä arvoista. Kausivaihteleva phi on merkitty ϕ_S missä S on kausivaihtelun pituus.

Sovitimme pörssisähkön hintojen aikasarjaan

kaksi SARIMA-mallia. Malleista ensimmäinen käyttää tämän päivän hintojen selittämiseen edellisen päivän hintoja ja ennustevirhettä. Malleista toinen käyttää edellisen tunnin hintaa ja edellisen päivän ennustevirhettä. Lisäksi kokeilimme sähkön hinnan selittämiseen kahta yksinkertaista ennustetta eli edellisen päivän hintaa vastaavalla tunnilla sekä edeltävän tunnin hintaa. Nämä mallit eivät siis käytä sähkön hinnan selittämiseen mitään muita tietoja kuin aikaisempia hintoja. Tämä muistuttaa rahoituksen teorian puolella tyypillistä tehokkaiden markkinoiden hypoteesia, jonka mukaan kaikki tarvittava ja saatavilla oleva informaatio on jo leivottu sisään hintoihin.

Käytetyt aikasarjamallit ovat:

SARIMA(0,0,0)(1,1,1,24), joka on muotoa $(1 - \phi_{24}B^{24})\Delta_{24}Z_t = (1 + \theta_{24}B^{24})a_t$

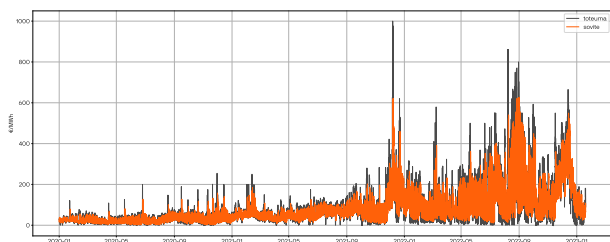
SARIMA(1,1,0)(0,1,1,24), joka on muotoa $(1 - \phi_1B)\Delta\Delta_{24}Z_t = (1 + \theta_{24}B^{24})a_t$

Edellisen tunnin hintaan pohjautuva ennuste $y_t = B = y_{t-1}$

Edellisen päivän hintaan pohjautuva ennuste $y_t = B^{24} = y_{t-24}$

Edellisen päivän hintaan pohjautuvan SARIMA-mallin sovite on esitetty kuvassa 14 ja tasoitettuna kuvassa 15.

Kuva 14: SARIMA(0,0,0)(1,1,1,24) mallin sovite



Käytettyjen mallien keskimääräiset virheet on eritelty taulukossa 2. Tarkin sovite saadaan SARIMA-mallilla, joka hyödyntää edellisen tunnin hintatietoa. Seuraavaksi tarkin ennuste saadaan perusmallilla, joka sisältää edellisen tunnin hintatiedon. Kolmanneksi tarkin malli on sellainen, joka ennustaa että seuraavan tunnin hinta

Kuva 15: SARIMA(0,0,0)(1,1,1,24) mallin sovite



on yhtä suuri kuin edellisen tunnin hinta. Tämän pohjalta voidaan sanoa, että peräkkäisten tuntien hinnat ovat pörssisähkössä yleensä lähellä toisiaan.

Pörssisähkön hinnat määräytyvät kuitenkin aina vuorokaudeksi eteenpäin, joten edellisen tunnin hinta ei ole saatavilla muiden kuin vuorokauden ensimmäisen tunnin hinnan ennustamiseen. Nämä mallit eivät siis ole sellaisenaan käyttökelpoisia sähkön hinnan ennustamiseen. Niiden todellisen tarkkuuden arvioimiseksi pitäisi jättää osa aineistosta mallin sovittamisen ulkopuolelle, jotta iteratiivisesti tunti kerrallaan tehtyjen ennusteiden ja niiden pohjalta laskettujen uusien ennusteiden tarkkuutta voisi verrata toteutuneeseen kokonaisilla 24 tunnin jaksolla. Varsinainen benchmark kehitetyille malleille on siis sellainen, joka ennustaa että tämän päivän hinnat ovat yhtä suuret kuin edellisen päivän hinnat. Tähän verrattuna perusmalli pärjää hyvin, erityisesti jos mallille antaa edellisen päivän hintatason. Myös pelkkiä hintatietoja käyttävä SARIMA-malli soveltuu seuraavan päivän hinnan ennustamiseen naiivia malleja paremmin.

3.3 Autokorrelaation korjaaminen

Sovitimme vielä yhden mallin jossa jätimme pois hiilen johdannaishinnat multikollineaarisuusongelman vuoksi ja korjasimme ensimmäisen kertaluvun autokorrelaatiota käyttäen Cochrane-Orcuttin menetelmää. Laskenta tehtiin käyttäen tilastolaskentaohjelmisto R:n `orcutt`-kirjaston funktiota `cochrane.orcutt` jolle annettiin syötteenä `lm`-objekti. Mallin selitysaste laski merkittävästi ollen enää 0.318, mutta Durbin-Watson testin arvo nousi samanaikaisesti 1,8:aan eli korjaus poisti valtaosan autokorrelaatiosta.

Taulukko 2: Mallien virheiden itseisarvojen keskiarvot

Malli	Mean absolute error (€/MWh)
Edellisen tunnin hinta	6.70
Edellisen päivän hinta	58.78
Perusmalli	15.86
Perusmalli edellisen päivän hinnalla	13.90
Perusmalli edellisen tunnin hinnalla	6.43
SARIMA(0,0,0)(1,1,1,24)	17.23
SARIMA(1,1,0)(0,1,1,24)	6.05

Selitysasteen lasku viittaa mielestämme siihen, että hintasignaaleissa on mukana piileviä tekijöitä jotka vaikuttavat sähkön hintaan. Myös korjatun mallin kertoimien mukaan OL3:n vaikutus sähkön hintaan on noin 5 snt/kWh.

hon vaikuttaa mahdollisesti useat sellaiset tekijät, joita emme ole sisällyttäneet malliin. Esi-merkkejä tällaisista voisi olla naapurimaiden hintataso, tuotantomäärät, kulutusmäärät, siirtora-joitukset jne.

4 Lopuksi

Tarkastelimme pelkästään seuraavan tunnin hintoja käyttäen hyväksi hinnanmuodostushetkellä saatavilla olevia tietoja. Lämpötilaennusteiden puutteessa käytimme toteutuneita lämpötiloja, sillä uskomme että sähkön hintoja muodostettaessa lämpötila ja yleisemmin sähköä on mahdollista ennustaa melko tarkasti seuraavalle päivälle.

Tuloksista ei voi vetää johtopäätöksiä pidemmän aikavälin, esimerkiksi seuraavan vuorokauden tai seuraavan viikon ennustetarkkuuden kanssa. Toistaiseksi tuntien määrä jolloin Olkiluoto 3 on tuottanut sähköä on kovin rajallinen joten päätimme hyödyntää kaikki käytettävissä olevat havainnot mallin sovittamiseen. Myöhemmin olisi mahdollista rajata osa aineistosta sivuun mallin arvioimista varten ja rakentaa iteratiivisesti pidemmän aikavälin ennusteita käyttäen syötteenä seuraavan tunnin hintaennustetta.

Toistaiseksi Olkiluoto 3:sta on ajettu ennalta määrätyn koekäyttöohjelman perusteella riippumatta sähkön hinnasta. Mallin tulokset eivät välttämättä ole sellaisenaan sovellettavissa voimalaitoksen kaupalliseen käyttöön.

Yhteenvedon toteamme, että sähkön hinnan muodostuminen on monimutkainen prosessi, jo-

Kirjoittajista



Sami Kohvakka

Data Scientist

Väreellä Sami toimii datatieteilijänä ratkomassa eri liiketoimintayksiköiden tiedon tarpeita ja liiketoimintaprosessien digitaalista murrosta automaatioiden, tilastollisen mallintamisen, testaamisen ja koneoppimisen keinoin. Koulutukseltaan Sami on rahoituksen ja liiketoimintanalytiikan maisteri sekä tietotekniikan diplomi-insinööri LUT-yliopistosta.