

Oskari Jokitalo

**PIENTALON ENERGIAKUSTANNUSTEN
VÄHENTÄMINEN SÄHKÖN HINNAN
VOLATILITEETIN AVULLA**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Aleksi Sivonen
Tammikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Oskari Jokitalo: Pientalon energiakustannusten vähentäminen sähkön hinnan volatiliteetin avulla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Tammikuu 2024

Vihreän siirtymän hitaus, ukrainan sota ja riippuvuus fossiilisista polttoaineista ovat pääasiallisina syinä johtaneet Suomessa energianhintojen voimakkaaseen kasvamiseen. Lisäksi sähkömarkkinoiden nykyinen malli mahdollistaa hintojen voimakkaan vaihtelun hinnan määräytyessä kullekin käyttötunnille kalleimman tuotantotavan mukaan. Tämä on johtanut pientaloasukkaan energiakustannusten voimakkaaseen nousuun, ja tässä työssä perehdytäänkin pientaloasukkaan mahdollisuuden vähentää energiakustannuksia hyödyntämällä nykyistä sähkömarkkinamallia.

Sähkön käytöstä laskutettavat verkkopalvelumaksut perustuvat sähköverkon rakentamiseen ja ylläpitoon, eikä kuluttaja voi tätä kilpailuttaa. Sähköenergian hinta muodostuu sen sijaan sähkömarkkinoilla. Pientaloasukkaan näkökulmasta mahdollisuudet vaikuttaa energiakustannuksiin ovat rajalliset. Sähköenergian osuuteen pientalo asukas voi vaikuttaa kilpailuttamalla sähkösopimuksen vähittäismarkkinoilla. Merkittävin ero sopimusten välillä liittyy hintarisktiin. Pörssisidonnaisessa sopimuksessa hinta perustuu sähkömarkkinoilla syntyvään hintaan kullekin käyttötunnille erikseen. Kiinteähintaisissa sopimuksissa hinta säilyy sopimuksen ajan samana ja yleensä se on sitä edullisempi, mitä pidempiaikainen sopimus on kyseessä.

Nykyinen sähkömarkkinamalli sekä yleinen tilanne energiamarkkinoilla ja sähköverkossa ovat johtaneet yksittäisten tarkastelujaksojen välillä sähkön hinnan volatiliteetin kasvuun. Yksi vaihtoehto pientalon energiakustannusten vähentämiseen on valita pörssisähkösopimus ja ajoittaa kulutus volatiliteetin mukaan. Pientalossa suurin osa laitteista on käyttäjälähtöisiä, jotka soveltuvat huonommin niiden käytön ajoittamiseen. Termostaattiohjatut laitteet ovat sen sijaan tähän hyvin soveltuvia, kuten varaavat sähkölämmityslaitteet. Niiden käytön ajoittamisen tuoma energiakustannusten väheneminen on riippuvainen laitteen teholuokasta ja varauskapasiteetista sekä lämmöntarpeesta.

Työssä laskettiin esimerkkikohteen avulla vuosittaiset energiakustannukset optimoimalla varaajan käyttöä sähkön pörssihinnan mukaan. Excel-laskentaohjelman avulla erotettiin varaajan käyttämä energia muusta kohteen sähköenergian kulutuksesta ja ajoitettiin se edullisimmille pörssisähkön hinta-aikasarjan tunneille kunkin vuorokauden sisällä. Tulokset osoittavat, että hyödyntämällä sähkön hinnanvaihtelua esimerkkikohteessa olisi voitu vähentää energiakustannuksia jopa 51 prosenttia verrattuna kiinteähintaiseen keskirarvolliseen sähköenergian hintaan vuonna 2023. Mikäli lämmöntarve ja varauskapasiteetti mahdollistavat, lämmityksen optimoinnin voi tehdä pidemmälle kuin vuorokauden ajanjaksolle, ja näin saatu säästö olisi kasvanut 55 prosenttiin.

Tulokset ovat suuntaa antavia, mutta osoittavat selvästi, että pientalon, jossa on varaava sähkölämmitys, kannattaa selvittää mahdollisuus pörssisähkösopimukseen ja sähkön käytön optimointiin. Nykyisen sopimuksen hintataso, sähkön hinnan volatiliteetin voimakkuus sekä riskinsietokyky optimointiin tarvittavan laitteiston lisäksi ovat ratkaisevia asioita aloittaa energiakustannusten optimointi tällä tavalla.

Avainsanat: optimointi, omakotitalo, energiakustannukset, pörssisähkö, varaava lämmitys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Sähköjärjestelmä	4
2.1	Sähköverkko	4
2.2	Sähkömarkkinat	5
3.	Sähkön hinta	7
3.1	Verkkopalvelumaksut ja verot	7
3.2	Sähköenergian hinta ja sopimusmallit.	8
4.	Volatiliteetti	11
4.1	Sähkön hinnan vaihtelu	11
4.2	Volatiliteetin hyödyntäminen	12
5.	Omakotitalon energiankulutus	14
5.1	Eri osien kulutusprofiilit	14
5.2	Laitteiden vertailu volatiliteetin hyödyntämiseen.	15
6.	Aineisto ja menetelmät	17
7.	Tulokset	20
8.	Johtopäätökset	22
	Lähteet	24

1. JOHDANTO

Energian hinta on noussut 2020-luvun alkuaikana. Suurimpana syynä tähän pidetään riippuvuutta fossiilisista energianlähteistä ja sitä kautta Venäjän rajoitustoimenpiteitä muun muassa kaasun viennin suhteen. Ukrainan sodan vuoksi vuonna 2022 erityisesti kaasumarkkinoiden muuttuminen johti vielä korkeampiin sähkön hintoihin. Sähkömarkkinat mahdollistavat itsessään rajun hetkellisen hintojen nousun, sillä hinta määräytyy kullakin käyttötunnille kalleimman tuotantotavan mukaan. Tähän vedoten yleisesti ajatellaan uusiutuvien energiamuotojen ja vihreän siirtymän olevan osasyyllinen hinnan nousuun. Euroopassa on kuitenkin oltu hyvin riippuvaisia tuontienergiasta fossiilisten energialähteiden osalta, ja tämä heijastuu myös Pohjoismaiden ja Suomen sähkön hintoihin. Mikäli vihreä siirtymä olisi tehty aiemmin, ei viimeaikaisilla kriiseillä olisi ollut niin suurta vaikutusta energian hintaan. (Pelli 2022)

Energian hinnan noustessa on myös sen vaihtelu voimistunut. Volatiliteettiin eli hinnanvaihteluun on monia syitä, mutta erityisesti uusiutuvien energianlähteiden kasvu ja ydinvoimaloiden suuret yksikkökoot sekä sääolosuhteiden vaihtuvuus aiheuttavat hintoihin voimakasta vaihtelua Suomessa. (Pelli 2022) Tuuli- ja aurinkoenergia tuottavat edullista sähköä, mutta vain silloin kun tuulee tai paistaa aurinko. Tämä aiheuttaa hetkellisiä todella edullisia hintoja. Vaikka ydinvoima pitkällä aikavälillä tuottaa edullista energiaa, suuren yksikön väliaikainen poistuminen tuotannosta joudutaan korvaamaan kalliilla tuotantomuodolla. Vesivoimalla voidaan helposti korvata tuulivoimatuotannon vaihtelevuutta, mutta kuivina jaksoina kapasiteetti on rajallista ja sateisina vuosina vesivoimaa on käytettävä edullisillakin tunneilla, etteivät altaat tule yli. Mikäli edulliselle tuotannolle tarvitaan korvaavaa tuotantoa ja kulutuskaan ei pysty joustamaan, joudutaan energia näillä ajanjaksoilla tuottamaan kalliimmilla helposti säädettävillä lauhdetuotantomuodoilla tai kaasuturbiineilla, jolloin hinta voi nousta todella korkealle. (Forsman et al. 2020)

Tulevaisuudessa volatiliteetti säilyy voimakkaana, mutta älykkäillä järjestelmillä ja yhteisemmällä siirtoverkolla siihen voidaan vaikuttaa (TEM 2019). Kulutusjousto on yksi keino pienentää volatiliteettia, mutta toisaalta volatiliteettia voidaan rajatuissa tapauksissa myös hyödyntää kulutusjouston tapaan siirtämällä kulutusta edullisille tunneille.

Pientaloasukkaan energiakustannukset ovat sähkön hinnan nousun vuoksi kasvaneet. Pientalossa lämmitykseen kuluu suurin osa energiasta ja riippuen lämmitysjärjestelmäs-

tä, siihen voidaan vaikuttaa eri tavoilla. Useissa tapauksissa lämmönlähteen vaihtamisella voidaan saada merkittävää säästöä energiankuluihin, mutta investointi voi olla kymmeniä tuhansia euroja (Motiva 2023). Lisäksi nykyinen järjestelmä ei välttämättä ole kovin vanha, joten syy suurelle investoinnille saattaa olla pelkästään säästö tulevaisuudessa.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää esimerkkikohteen avulla, kuinka paljon sähkölämmitteisellä pientalolla on mahdollista säästää lämmityskustannuksista hyödyntämällä sähkön hinnan volatiliiteettia edullisen ja älykkään laitteiston avulla. Perinteisesti sähkölämmittäjällä on kiinteä ja mahdollinen vuodenaika- tai yö/päivä-sähkösojimus, joiden hinnat seuraavat pörssisähkön keskimääräisiä hintoja. Hintojen vaihtelu ei kuitenkaan ole nykyään niin suurta pelkästään vuodenaikojen tai yön ja päivän välillä, vaan hinnat voivat vaihdella kaikkien ajanjaksojen välillä. Pörssisähkösojimuksen avulla kuluttaja voi vaikuttaa lopulliseen energiankustannukseen ajoittamalla käyttöä halvoille tunneille. Volatiliiteetin kasvaessa halpojen ja kalliiden tuntien eroja syntyy enemmän, ja tämän ilmiön hyödyntämiseen pientaloissa tässä työssä juuri perehdytään.

Tutkimusta ohjaavat kysymykset liittyvät sähkömarkkinoiden toimintaan omakotitalon näkökulmasta: sähkön hinnan muodostumiseen sekä mahdollisuuteen vaikuttaa siihen. Lisäksi merkittävimpana kysymyksenä on, paljonko sähkönkäytön optimoinnilla on mahdollista säästää omakotitalon energiankustannuksista. Kirjallisuuskatsauksen avulla perehdytään sähkömarkkinoiden toimintaan. Esimerkkikohteen kulutustietojen sekä SPOT-hintatilastojen avulla lasketaan Excel-laskentaohjelmalla optimaalinen energiakustannus ja verrataan sitä energiakustannuksiin kiinteillä sähkösojimuksilla.

Aiheesta löytyy paljon tutkimuksia ja laskelmia. Perkola 2020 tarkastelee opinnäytetyösään akuston hyödyntämistä rakennuksen sähkötehoaiippujen leikkaamisessa. Hakoniemi 2022 taas tutkii aurinkoenergian tehokasta hyödyntämistä omakotitalossa omassa opinnäytetyössään. Abdelilah et al. 2021 kertovat energiaraportissaan seikkaperäisesti uusiutuvan energian integroinnista ja energiatehokkuudesta asuinrakennuksissa Marokossa. Koskela 2016 puolestaan tutkii diplomityössään sähköenergian varastoinnin kannattavuutta kotitalouden energiankäytön hallinnassa. Kuitenkin energiamurroksen ja markkinoiden muuttumisen vuoksi useat tutkimukset ja laskelmat eivät vastaa nykytilannetta eivätkä ne sovellu suoraan nykyiseen malliin. Esimerkiksi pientuotannon netotus on ollut pakollista kaikille sähköyhtiöille 1.1.2023 alkaen (*Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta* 1133/2020). Pelkästään tämä muuttaa useiden laskelmien lopputuloksen. Näin ollen tämä tutkimus pyrkii myös samalla päivittämään tilanteen liittäen aiemmat tutkimustulokset nykyiseen tilanteeseen.

Luvussa 2 käsitellään sähköjärjestelmää ja esitellään pohjatietoa kokonaisuudelle perehtymällä sähköverkkojen ja sähkömarkkinoiden toimintaan. Luvussa 3 esitetään sähkön hinnan muodostuminen niin verkkopalvelumaksujen, verojen kuin sähköenergiankin osalta. Lisäksi esitetään kuluttajan vaihtoehtoiset sojimusmallit, joiden mukaan energiakus-

tannukset kertyvät. Sähköenergian hinnanvaihteluun, eli volatilitettiin, perehdytään luvussa 4. Luku 5 puolestaan käsittelee omakotitalon energiankulutusta, sen jakaumaa eri laitteille sekä mahdollisuutta hyödyntää kutakin laitetta energiankulutuksen optimoinnissa kustannuksien minimoinnin näkökulmasta. Esimerkkikohteen avulla tehty laskelma tästä optimoinnin hyödystä esitellään luvussa 6. Siinä käytetty aineisto ja menetelmät käsitellään luvussa 7 ja luvussa 8 tehdään johtopäätökset työn tuloksista ja kokonaisuudesta.

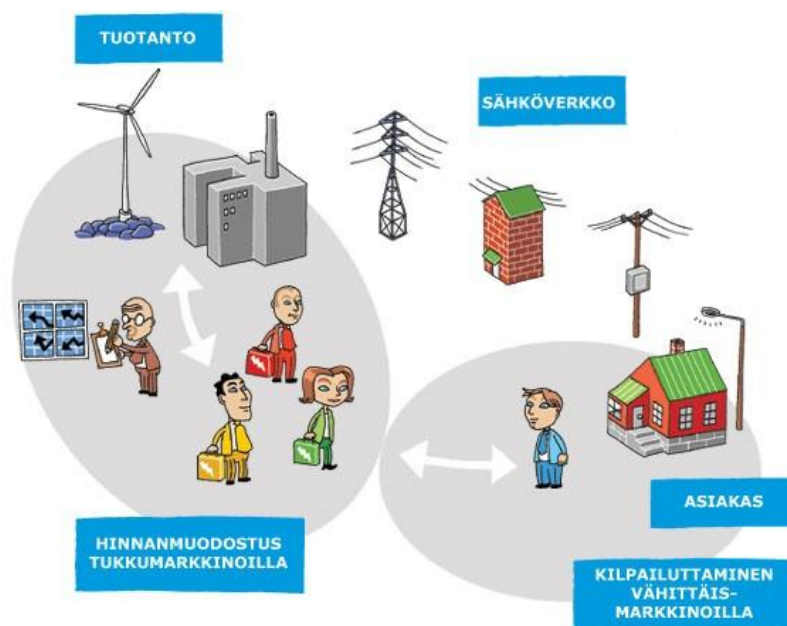
2. SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Sähköenergiajärjestelmä on infrastruktuurina tärkeä osa yhteiskuntaa. Nyky-yhteiskunnan arki perustuu merkittävältä osin sähköenergian käyttöön. Lähtien perustarpeista, kuten ruoan valmistuksesta ja sen säilyttämisestä tai asunnon lämmityksestä, se on lähes joka osa-alueella mukana. Sähköenergiajärjestelmän kehittäminen ja ylläpito tähtääkin tehokkaaseen sähköenergian käyttöön. Sähköverkko fyysisenä tuotteena yhdistää tuotannon ja kulutuksen, joiden välillä tehdään sopimuksia sähkön toimituksesta ja sen hinnasta. Hinta sähköenergialle muodostuu sähkömarkkinoilla, jotka ovat osa sähköenergiajärjestelmää (Fingrid 2023b). Näin kuluttajalle sähkön käyttö on tehty helpoksi ja tehokas sähköenergiajärjestelmä pitää hinnan kohtuullisena. Kuluttajan tarvitsee vain maksaa sähkönmyyjälle ja jakeluverkkoyhtiölle käyttämästään sähköstä. Sen hintaan vaikuttavat kuitenkin monet seikat sähköenergiajärjestelmän sisällä, ja sitä avataan yksityiskohtaisemmin tässä luvussa.

2.1 Sähköverkko

Sähköverkkoyhtiöt mahdollistavat sähköverkoillaan sähkön siirtymisen sen tuottajilta sähkön kuluttajille, kuten on esitetty kuvassa 2.1. Sähköverkkoyhtiöitä ovat kantaverkkoyhtiöt ja jakeluverkkoyhtiöt. Suomessa Fingrid toimii ainoana kantaverkkoyhtiönä, mutta jakeluverkkoyhtiöitä Suomessa on useita, kuten Elenia Verkko Oyj ja Helen Sähköverkko Oy. Kantaverkkoyhtiönä Fingrid vastaa sähkönsiirron toimivuudesta kantaverkossa ja huolehtii, että Suomi saa sähköä häiriöttä. Jakeluverkkoyhtiöt puolestaan huolehtivat, että sähkö siirtyy sen tuottajalta kuluttajalle. Niiden sähköverkot ovat yhteydessä kantaverkkoon, jolloin koko Suomen alueesta tulee yhtenäinen verkko ja yhteinäiset markkinat. Kantaverkkoyhtiön siirtoyhteyksillä Viroon ja Ruotsiin, Suomi on myös yhteisessä markkinassa etenkin Pohjoismaiden kanssa, mutta tulevaisuudessa yhä enemmän koko Euroopan alueen kanssa. (Fingrid 2023a)

Jakeluverkkoyhtiöt ovat rakentaneet sähköverkon omalle alueelleen. Jokaiselle käyttöpäikälle ei ole kustannustehokasta rakentaa kahta tai useampaa sähköverkkoa, jotta käyttäjä voisi kilpailuttaa sähkönsiirtoyhtiönsä. Näin ollen jakeluverkkoyhtiöllä on paikallinen monopoliasema. (Kiinteistö ja energia 2023) Tätä monopoliasemaa valvoo Suomessa Energiavirasto. Valvontaan kuuluu ennenkaikkea kohtuullisen hinnan varmistaminen ja



Kuva 2.1. Sähköenergiajärjestelmä (Energiamaaailma 2023)

toimituksen luotettavuuden varmistaminen. (Sähkömarkkinalaki 588/2013)

2.2 Sähkömarkkinat

Sähkömarkkinoilla sähköenergian kysyntä ja tarjonta kohtaavat. Se on yksi tapa varmistaa kysynnän ja tarjonnan tasapaino ja näin varmistaa valtakunnallinen sähkönsaanti. Suomen sähkömarkkinat ovat osa pohjoismaista sähkömarkkinaa ja kilpailu yhteisillä pohjoismaisilla markkinoilla mahdollistaa laadukkaan palvelun kustannustehokkaasti, kannustaa innovaatioihin ja laskee sähkön hintaa (eSett 2023). Markkinapaikkoja on useita, ja seuraavaksi käydään läpi vähittäismarkkinahintaan eniten vaikuttavat osa-alueet.

Vuorokausimarkkinoilla markkinatoimijat arvioivat seuraavan päivän tuotantoon tai kuluustaan ja jättävät tarjouksensa jokaiselle tunnille erikseen klo 13 Suomen aikaan mennessä. Tarjoukset sisältävät tarkastelujakson aikaisen tehon (MW), tarjousalueen, ja hinnan (€/MW). Siirtokapasiteettien ja osto- sekä myyntitarjousten perusteella sähköpörssit laskevat jokaiselle tunnille hinnan. Siirtokapasiteetti voi rajoittaa siirtoa tarjousalueiden välillä ja aiheuttaa näin hintaeroja eri alueille. (Fingrid 2023b)

Toimitushetken lähestyessä voi kuluttaja, säätilanne tai vikaantunut laite tuotannossa tai kulutuksessa vaikuttaa kunkin tunnin kulutus- tai tuotantomäärään. Jotta kulutus ja tuotanto saadaan tasapainoon, käydään vielä kauppaa päivän sisällä. Näin markkinatoimijalle annetaan päivänsisäisillä markkinoilla mahdollisuus muuttaa aiempaa tuotanto- tai kulutusarviotaan vielä lähempänä toimitushetkeä. Suomessa tämä on mahdollista aina toimitustunnin alkamiseen asti. (Fingrid 2023b)

Säätösähkömarkkinoilla Fingrid valtakunnallisena tasevastaavana varmistaa, että sillä on tarvittava kapasiteetti säätää kulutusta tai tuotantoa niiden välisen tasapainon ylläpitämiseksi. Kunkin käyttötunnin ja -hetken tehtasapainon tarpeen mukaan markkinaosapuolten tarjouksia aktivoidaan. Taajuudenvakautusreserveillä ja automaattisilla taajuudenpalausreserveillä käydään kauppaa reservimarkkinoilla. Näiden avulla Fingrid varmistaa sähköjärjestelmän toimivuuden jokaisena hetkenä. (Fingrid 2023b)

Tasemarkkinoiden avulla markkinatoimijoita kannustetaan mahdollisimman hyvään tuotantotai kulutusarvioon. Sähkön toimituksen jälkeen markkinatoimijoiden tarjotun ja toteutuneen tuotannon ja/tai kulutuksen välinen ero tarkistetaan. Mikäli tasevastaavan suunniteltu tuotanto tai kulutus ei toteudu, sähköjärjestelmässä tarvitsee tehdä säätöä. Tämän erotuksen eli taseen laskemisen avulla voidaan säädöstä aiheutuneet kustannukset jakaa niiden aiheuttajille. Ne joilla on tasepoikkeamaa maksavat tai saavat rahaa poikkeaman suunnan, suuruuden ja tasesähkön hinnan mukaan. Tasesähkön hinta on kuitenkin maksimissaan SPOT-hinnan mukainen. (eSett 2023)

Edellä käytyjen lisäksi johdannaisilla tehdään myös kauppaa sähkömarkkinoilla. Niillä voidaan suojata hintaa tulevilta hintapiikeiltä tai varmistaa jokin minimituotto myyntitarjouksille. Myös OTC-markkinat (over-the-counter) vaikuttavat osaltaan tukkuhintaan, sillä sähköä voidaan myydä tällä tavalla tukkumarkkinoiden ulkopuolella suoraan tuottajalta kuluttajalle, yleensä teollisuuteen ja muille suurasiakkaille. (Fingrid 2023b)

Sähkömarkkinat ovat siis tukkumarkkinoita, jossa sähkön tuottajat ja myyjät sopivat järjestelmän ja eri markkinapaikkojen avulla hinnan sähkölle. Tukku markkinoilta sähkömyyjät puolestaan välittävät sähkön edelleen loppukäyttäjälle, joka maksaa sähkön käytöstä vähittäismarkkinahintaa. Tätä vähittäismarkkinahintaa käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

3. SÄHKÖN HINTA

Kuluttajat ostavat sähkön vähittäismarkkinoilta. Vähittäismarkkinoiden hinnat pohjautuvat tukkumarkkinoiden hintoihin, kuten kuvattiin luvussa 2.2, verkkopalvelumaksuihin ja veroihin. Vähittäismarkkinoiden myyjät ovat tukkumarkkinoilla ostajia, jotka välittävät sähköä tukkumarkkinoilta kuluttaja-asiakkaille. Sähköenergian hinta koostuu yleisesti tukkumarkkinahinnasta ja myyntikustannuksista. Sähkön kokonaishintaan vaikuttaa kuitenkin paljon myös verkkopalvelumaksut, sillä sähköenergian siirtäminen kuluttajille on kustannuksiltaan samaa luokkaa kuin sähköenergian tuottaminen ja myyminen. Valtio perii lisäksi sähköveron, jonka laskuttaa sähkönsiirtoyhtiö. Arvonlisävero sisältyy kaikkiin sähkönhinnan osa-alueisiin.

3.1 Verkkopalvelumaksut ja verot

Sähköenergian kustannuksista verot ovat yksi osuus, johon kuluttaja-asiakas ei voi vaikuttaa. Sähkövero koostuu valmisteverosta ja huoltovarmuudesta, joiden suuruudet ovat kotitalouksille eli veroluokan 1 maksajille 2,23 c/kWh ja 0,013 c/kWh. (Verohallinto 2023)Tähän lisätään vielä arvonlisävero, jolloin sähköveron osuus on yhteensä 2,794 c/kWh. Lisäksi sähköenergian hintaan ja siirtomaksuihin lisätään arvonlisäverot. (Energiateollisuus 2023b)

Verkkopalvelumaksuihin kuluttaja-asiakas voi vaikuttaa ainoastaan muuttamalla toisen verkkoyhtiön alueelle. Verkkopalvelu- eli siirtomaksut tulevat jakeluverkkoyhtiöltä ja niiden hinnat ovat aluekohtaisia. Hintoja valvoo Energiavirasto, joka sähkömarkkinalain puitteissa määrittää reunaehdot verkkopalvelumaksujen laskuttamiselle. Tuottokatto on valvontamenetelmän perusta ja se määritellään sallimalla sähköverkkoon sitoutuneelle pääomalle kohtuullinen tuotto. (Energiavirasto 2023a)

Jakeluverkkoyhtiölle muodostuu kuluja muun muassa verkon suunnittelusta, rakentamisesta, ylläpidosta, huollosta, asiakaspalvelusta, energiamittauksesta taseselvityksistä, asiakaspalvelusta ja hallinnosta. Nämä verkkopalvelun tuottamisesta syntyneet kustannukset ja verkkoyhtiön laskuttamat tulot ovat oltava tuottokattoa pienemmät. (Energiavirasto 2023a) Suurin osa jakeluverkkoyhtiöistä ovat osakeyhtiöitä, joiden omistuspohja voi esimerkiksi olla useammalla kunnalla, kaupungeilla tai suuremmilla yhtiöillä. Omistuspohja voi vaikuttaa strategiaan voiton tavoittelun suhteen. (Latvanen 2020)

Taulukossa 3.1 on listattuna muutamien jakeluverkkoyhtiöiden hinnastot sisältäen arvonlisäverot pääsulakekoon 3x25 A mukaan. Siitä nähdään, että yksittäisillä yhtiöillä perusmaksun hintaero voi olla yli viisikertaa ja siirtomaksu yli kaksikertaa korkeampi.

Taulukko 3.1. Verotus ja verkkopalvelumaksut

Verot	Caruna Oy	Tampereen Energia Sähköverkko Oy	Oulun Energia Sähköverkko Oy
Valmistevero c/kWh	2,23	2,23	2,23
Huoltovarmuusmaksu c/kWh	0,013	0,013	0,013
Yht. sis. alv. c/kWh	2,794	2,794	2,794
Yleissiirto			
Perusmaksu €/kk	28,58	4,77	5,679
Siirtomaksu c/kWh	5,07	2,962	2,81
Yösiirto c/kWh			
Perusmaksu €/kk	36,62	13,04	16,53
Päiväsiirto c/kWh	4,92	3,1	2,37
Yösiirto c/kWh	3,01	1,327	1,45
Vuodenaikasiirto			
Perusmaksu €/kk	36,62	23,52	21,14
Päiväsiirto c/kWh	6,47	4,997	2,57
Muun ajan siirto c/kWh	3,11	2,158	1,72

Siirtomaksujen hinnat vaihtelevat suuresti eri yhtiöillä. Voiton tavoittelun merkityksen lisäksi vaikutusta on paljon asukastiheydellä. Tiheään asutuilla alueilla yhden käyttöpai-kan liittäminen sähköverkkoon voi vaatia merkittävästi lyhemmän osuuden sähköverkon pituudesta (Mäkilä 2019).

Hinnoista nähdään, että eri tariffeilla on mahdollista säästää, jos kulutusta pystyy ajoittamaan aikatariffien edulliselle ajalle. Suuremmat erot ovat kuitenkin aluekohtaisia eli jakeluverkkoyhtiöstä riippuvaisia. Tähän voi vaikuttaa vain muuttamalla toisen jakeluverkkoyhtiön alueelle.

3.2 Sähköenergian hinta ja sopimusmallit

Sähköenergian vähittäismyyntihinta perustuu tukkumarkkinahintoihin. Sähkönmyyjät ostavat sähkön tukkumarkkinoilta ja tekevät myyntisopimuksia loppukäyttäjien kanssa. (Energiavirasto 2023b)

Välttämättömyyspalveluna ja ilmastonmuutoksen torjunnan keskiössä sähkö ja sähkön myynti on erityissäänneltä, mikä rajoittaa sopimusvapautta vähittäismyynnissä. Sähkökaupan osapuolet voivat kuitenkin sopia keskenään sähkönmyynnistä, sillä kaikkea ei ole rajoitettu yksityiskohtaisesti. Vähittäismyyjillä on velvollisuus tiedonvaihtoon ilmoittamalla muun muassa alkavasta ja päättyvästä toimituksesta. (Energiavirasto 2023b)

Verkonhaltijat huolehtivat mittauksesta ja tulokset myyjän hankkimasta ja myymästä sähköstä kirjataan sähkötaseeseen, jonka perusteella sähkönmyyjä maksaa käytetyn sähkön mukaan. Myyjän laskutus puolestaan perustuu täysin mittaustietoihin myyntisopimusten mukaisesti. (Energiavirasto 2023b)

Sähkönmyyjä tekee sähkösopimuksia loppukäyttäjän kanssa ja niissä on yleisesti samat mallit kuin verkkopalvelumaksuissa. Yleensä siirtopalvelulle ja sähköenergialle valitaan myös rakenteeltaan samanlaiset tariffit.

Yleistariffissa maksut ovat kaikkina aikoina samat. Yleissähköopimukseksi kutsutussa mallissa on kiinteä perusmaksu €/kk ja kulutusmaksu c/kWh. Yleistariffi mallia käytetään erityisesti pienissä kohteissa, kuten kerrostaloasunnoissa, joissa kulutus on pientä ja tasaista ympäri vuoden. (Kilpailuttaja 2023)

Aikatariffimalleista on yleensä käytössä aikasähkö/yösähkö tai kausisähkö eli vuodenasähkö. Näissäkin malleissa perusmaksu on kiinteä €/kk, mutta kulutusmaksu on jaettu kahteen hintaluokkaan c/kWh. Se jaotellaan esimerkiksi aikasähköopimuksessa niin, että päivällä ja yöllä on eri hinta. Yleisesti aikatariffin yö/päivä-hinnoittelu jakautuu päivä sähköksi 07-22 väliselle ajalle ja yö sähköksi 22-07 väliselle ajalle. Kausisähkössä yleisesti talvipäivän hinta on marraskuulta maaliskuun loppuun 07-22 välisenä aikana ja muun-ajan -hintaa on käytössä lopun ajan vuodesta sekä talvipäivän tunneista. (Kilpailuttaja 2023)

SPOT-tariffi eli pörssisidonnainen sopimusmalli pohjautuu suoraan tukkumarkkinahintaan. Siinä sähkönmyyjä siirtää hintariskiä sähkön käyttäjälle ja lisää pörssin tuntihintaan oman marginaalinsa/välityspalkkionsa, jolla katetaan muun muassa myynti ja markkinointi kulut. Sopimusmallista riippuen on yleensä lisäksi kiinteä perusmaksu niinkuin muissakin tariffeissa. (Energiavirasto 2023b)

Kaikista tariffeista paitsi SPOT-tariffista on saatavissa määräaikaaisia sopimuksia, jolloin hinta on yleensä hieman edullisempi. Määräaikaaisissa sopimuksissa hinta sidotaan tiettyyn arvoon sovitulle ajalle. Toistaiseksi voimassa olevissa sopimuksissa hinta voi vaihdella ja sopimustyyppistä riippuen hinnan vaihtelusta täytyy ilmoittaa. Toistaiseksi voimassa olevan sopimuksen voi yleensä purkaa esimerkiksi 14 vuorokauden irtisanomisajalla.

Taulukko 3.2. Sähkön hintatarjoukset 10.10.2023

Tariffi	Energiamaksu c/kWh	Perusmaksu €/kk
Yleissähkö	9,95	3,5
Aikasähkö päivä	10,60	3,5
Aikasähkö yö	8,98	
Kausisähkö talviarvipäivä	11,58	3,5
Kausisähkö muu aika	9,48	

Taulukossa 3.2 on eritelty sähköntoimittajan nykyisiä sähkön tarjoushintoja eri tariffeille. Hinnat ovat toistaiseksi voimassa oleville sopimuksille. (Vaasansähkö 2023) Huomataan, että sähköenergian osalta ei tällä hetkellä ole suurta vaikutusta sillä, tekeekö sopimuksen

yleisähkön ja kausi- tai aikasähkön välillä.

Maksimihyöty aikasähköstä 3.2 olisi yleissähkөөn verrattuna

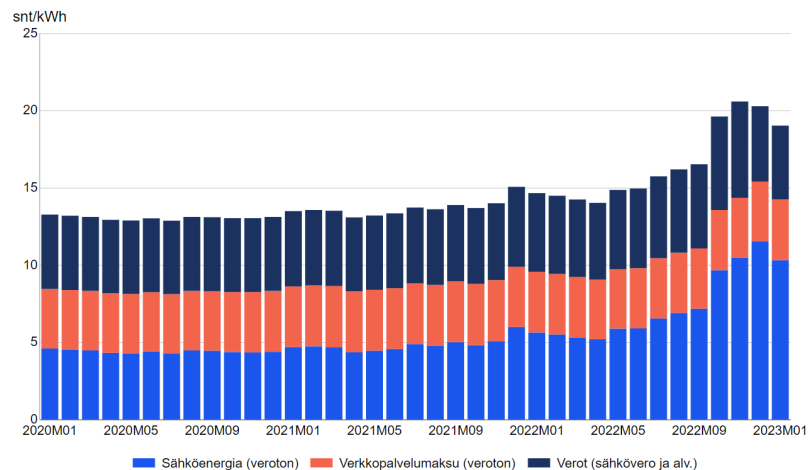
$$\frac{9,95 - 8,98}{9,95} = 9,75\%, \quad (3.1)$$

ja kausisähkөөstä 3.2 hyöty olisi puolestaan

$$\frac{9,95 - 9,48}{9,95} = 4,72\%. \quad (3.2)$$

Todellisuudessa kulutuksesta osa olisi kuitenkin kalliimmalla aikajaksolla, joten molempien todellinen hyöty on nykyään lähes merkityksetön energiamaksujen osalta.

Keskimääräistä sähköhintaa edelliseltä neljältä vuodelta kuvataan tilastokeskuksen kuvaajassa 3.1. Siitä huomataan, että sähköenergian osuus on kasvanut merkittävästi ja kävi korkeimmillaan vuoden 2022 loppupuolella.



Kuva 3.1. Sähkön hintakehitys 2020-2023 (Tilastokeskus 2023)

SPOT-tariffin keskihinnat ovat nousseet samassa suhteessa kuin kiinteiden sähkösojmusten hinnat. SPOT-tariffeissa on kuitenkin nykyään huomattavan paljon enemmän vaihtelua eli volatilitteettia. Tätä hinnan volatilitteettia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

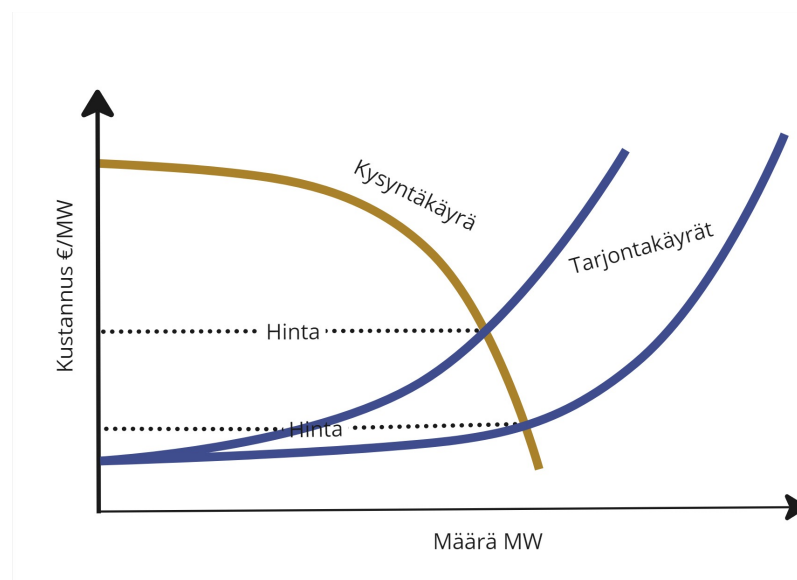
Vaikka markkinoiden yhdistämisellä ja kasvattamisella pyritään tasoittamaan hinnanvaihtelua, ei uusiutuvien energiantuotantomuotojen vaikutuksesta hinnanvaihteluun päästä eroon vielä pitkään aikaan. (TEM 2019) Tämä aiheuttaa siis tukkumarkkinoilla hinnanvaihtelua päivienkin sisällä, jolloin se näkyy myös pörssisähkön ostajien laskussa. Koska yleissähkö seuraa kuitenkin pörssisähkön keskimääräistä hintaa, jää pörssisähkön käyttäjälle mahdollisuus edullisempaan sähkön käyttöön mikäli kulutusta pystyy ajoittamaan halvemmille jaksoille.

4. VOLATILITEETTI

4.1 Sähkön hinnan vaihtelu

Volatiliteetillä kuvataan yleisesti arvopapereiden, osakkeiden, indeksien tai pörssien hintojen vaihtelua tietyllä ajanjaksolla. Sen ollessa korkealla käsitellyllä ajanjaksolla, hinnat vaihtelevat voimakkaasti ylös- ja alaspäin. Kun taas volatiliteetti on matalalla, hinnantvaihtelu ei ole voimakasta ja se pysyy vakaampana. (Hayes 2023)

Sähkön hinnan volatiliteetti syntyy sähkömarkkinoiden mekanismien mukaan. Kohdassa 2 esitellyn hinnanmuodostusmekanismin (kysynnän ja tarjonnan) mukaan eri markkinoilla sähkötarjousten perusteella syntyy hinta kullekin tarkastelujaksolle. Kuvassa 4.1 esitellään kahta eri tarkastelujaksoa, jotka voivat olla peräkkäiset tunnit. Tarkastelujaksojen kysyntäkäyrä pysyy samana, mutta tarjouskäyrä muuttuu esimerkiksi voimistuvan tuulen takia. Tästä seuraa joissakin tapauksissa merkittäviä hintaeroja eli voimakasta volatiliteettiä yksittäisten tarkastelujaksojen välille.



Kuva 4.1. Sähkön hinnan vaihtelu

Volatiliteetti sähköenergiamarkkinoilla on kasvanut, mutta kasvuun voidaan kuitenkin vaikuttaa. Dond et al. 2019 päätyvät tutkimuksessaan tulokseen, että uusiutuvien energia-
tuotantojen osuudella sähköntuotannossa on ollut voimistava vaikutus sähkön hinnan vo-

latiliteettiin. Tällä on kuitenkin alueellisia eroja, sillä esimerkiksi Tanskassa tuulivoiman tuotantokapasiteetti on niin suuri, että sillä voidaan tuottaa kaikki tarvittava sähköenergia, jolloin lyhyellä tarkastelujaksolla volatiliteetti voi olla kuitenkin pieni. Tähän tulokseen päätyivät myös Rintamäki et al. 2017 tutkimuksessaan, jonka mukaan Tanskassa lyhyellä aikavälillä hintavaihtelu on pienempi, kun tuulivoiman tuotantoa on enemmän, kun taas Saksassa tuulivoima lisää päivittäistä hinnanvaihtelua. Tanskan ja Saksan välistä eroa tuulivoiman vaikutuksista volatiliteettiin selittää myös siirtoyhteyksien rajallisuus ja Tanskan mahdollisuudet hyödyntää Pohjoismaiden vesivarastoja.

Sähkömarkkinat ovat vapautettu tehostamaan sähköenergiajärjestelmää ja vähentämään muun muassa sähkön hinnan volatiliteettia. Tulevaisuudessa yhä yhtenäisemmät markkinat koko EU:n alueella pienentävät volatiliteettiä (Morales & Hanly 2018). Näin esimerkiksi sähköverkkoa yhtenäistämällä myös Saksan sähköenergian hintojen volatiliteettiä voidaan hillitä. Euroopan Komission asetuksen mukaan energian toimintavarmuuden, lisääntyvän kilpailun ja kohtuuhintaisen energian kannalta toimivat ja yhtenäiset energian sisämarkkinat ovat erityisen tärkeitä (*Euroopan komission asetus (EU) 2017/2195*).

Uusiutuvien energianlähteiden lisääntyminen ja perinteisten voimalaitosten poistuminen markkinoilta lisäävät sähköntuotannon epävarmuutta. Sitä kautta ne lisäävät hinnan volatiliteettia myös tulevaisuudessa (TEM 2019). Volatiliteetin suuruuteen tulevaisuudessa vaikuttaa sähköverkon pullonkaulat ja merkittävältä osin myös sääolosuhteet. Työ- ja elinkeinoministeriön skenaariolaskelmassa (2019) korostuu sähköverkkojen vahvistamisen rooli Keski-Euroopan ja Pohjoismaitten välillä. Ydivoiman ikääntyminen 2023-luvun puolivälin jälkeen kasvattaa myös volatiliteettiä etenkin talviviikoilla, kun ydivoimaa korvataan uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla (TEM 2019).

Volatiliteetin vaikutukset ovat moninaiset. Stabiilien ja ennakoitavien markkinoiden kannalta volatiliteetti olisi hyvä olla matala. Kasvanut volatiliteetti onkin aiheuttanut toimenpiteitä, kuten kulutusjouston kasvua, kun tuotannon ja sähköverkon joustavuus ei ole enää riittävää (Energiateollisuus 2023a). Sähköverkon vahvistamisen lisäksi kulutusjousto korostuu entisestään ja useat suurasukkaat joutuvatkin ajoittamaan toimintaansa sähkön hinnan vaihtelun mukaan (Hartikainen 2022).

4.2 Volatiliteetin hyödyntäminen

Sähkön hinnan volatiliteetista ei kuitenkaan ole kaikille pelkästään haittaa. Yksinkertaisesti volatiliteetista voi hyötyä energiavaraston avulla. Energiavarasto ladataan edullisen käyttötunnin aikana ja puretaan takaisin verkkoon kalliin tunnin aikana. Volatiliteetin vaihtelun taajuus ja voimakkuus rajoittavat saatavan hyödyn.

Kiinteähintaisten sähkösopimusten hinnat seuraavat sähkön keskihintoja. Pörssisähkösopimuksella 3 sähkön hintariski siirretään asiakkaalle, jolloin asiakas voi vaikuttaa mak-

samaansa sähköenergian loppusummaan siirtämällä kulutustaan halvemmille tunneille. Pörssisähkösopimuksella sähkökäyttäjä voi siis saada halvemman kokonaiskustannuksen sähkölle kuin kiinteällä sähkösopimuksella, optimoimalla sähkönkulutuksen ajoitusta.

Tällaiseen kulutusjoustoksi kutsuttuun volatilitietin hyödyntämiseen tarvitsee kuitenkin olla kyky ajoittaa sähkökäyttöään. Luonnollisesti sähkölaitteista suuritehoisimpien ja eniten sähköä kuluttavien laitteiden ajoittaminen tuo suurimman hyödyn volatilitietista. Omakotitalon energiankulutusjakaumaan ja laitteiden mahdollisuuteen hyödyntää tätä sähkön hinnanvaihtelua tarkastellaan seuraavassa luvussa.

5. OMAKOTITALON ENERGIANKULUTUS

Asumisen energiankulutus on Suomessa yhteensä noin 70 TWh vuodessa. Asuintilojen lämmittämiseen siitä menee noin kaksi kolmasosaa, riippuen muun muassa eristyksistä, tiiveydestä, lämmityslaitteesta ja muun kulutuksen suuruudesta. Käyttöveden lämmityksen osuus puolestaan on noin 15 prosenttia. Ruoanlaitto ja valaistus kuluttavat noin 3 prosenttia ja sauna 5 prosenttia. Pyykinpesukone, jääkappi sekä pakastin ja muut sähkölaitteet kuluttavat loput noin 10-15 prosenttia. (Tilastokeskus 2023) Omakotitalon energiakustannukset muodostuvat siis suurelta osin asunnon lämmittämisestä, sekä käyttöveden lämmittämisestä. Tätä vahvistaa myös Järventausta et al. (2015) raportissaan, mistä käy ilmi, että omakotitalon keskimääräinen sähkötehon tarve on selkeästi suurin lämmityksen osuudessa (Järventausta et al. 2015). Tässä luvussa käsitellään tarkemmin omakotitalon energiakulutusjakaumaa eri laitteiden välillä sekä niiden mahdollisuutta hyödyntää sähköhinnan volatileettia.

5.1 Eri osien kulutusprofiilit

Sähkölaitteiden kulutus voidaan jakaa suuruuden ja ajallisen käytön mukaan. Kokonaiskulutus ajoittuu arkipäiville ja niiden kulutuspiikit osuvat iltapäiville, kotitalouksien sähkönkäytöstä johtuen. Viikonloppuisin kokonaiskulutus pienenee, koska teollisuus ja yritykset kuluttavat vähemmän energiaa viikonloppuisin. Myös päivän sisäinen jakauma tasoittuu viikonloppuisin illan kulutuspiikkiä lukuunottamatta. (Jardini et al. 2000)

Lämmitysenergia kuluttaa suurimman osan omakotitalon energiantarpeesta. Tyypillinen omakotitalon lämmitysjärjestelmän teho on 6-15 kW. Lämmitysenergian tarpeen kattaminen eri lämmitysmuodoilla aiheuttaa kuitenkin isoja eroja lopulliseen energiankulutukseen. Yleisesti suuremmasta alkuinvestoinnista seuraa pienempi vuotuinen energiankulutus, millä lämmitystarve katetaan. Hyötysuhdetta eri laitteille esitellään taulukossa 5.1, mistä huomataan, että eri lämpöpumput pienentävät merkittävästi lopullista energiantarvetta. Samassa taulukossa on myös eritelty alkuinvestoinnit, mistä nähdään, että kasvatamalla investointia, saadaan pitkässä juoksussa pienennettyä vuosikustannuksia. (Motiva 2023) Kuitenkin vaikka uusissa pientaloissa yleisin lämmitysmuoto on nykyään maalämpö, on Suomessa edelleen lähes puoli miljoonaa sähkölämmitystaloa (Järventausta et al. 2015). Muutoin lämmitysenergian lähteet jakautuvat tärkeimpien lämmönlähteiden

Taulukko 5.1. Lämmitysjärjestelmien hyötysuhteet ja alkuinvestoinnit (Motiva 2023)

Lämmitysjärjestelmä	Hyötysuhde SPF	Alkuinvestointi €
Maalämpö	2,9	27 000
Suorasähkö	0,99	5 000
Vesikiertoinen sähkö	0,90	7000
Ilmavesilämpöpumppu	2,3	15 000

mukaan seuraavasti: kaukolämpö 30%, puu 27% ja sähkö 25%, josta lämpöpumppuenergian osuus on 13%. (Tilastokeskus 2023)

Riippuen lämmölähteestä, energiankulutus jakautuu lämmityksen osalta hyvin eritavalla. Muut kuin sähkölämmitykset seuraavat suoraan lämmityksen tarvetta, mutta sähkölämmitys ja erityisesti varaava sähkölämmitys on ajoitettu riippumaan kellonajasta sekä vuodenajasta 3.2. Sähkön kausi- ja yö/päivä-hinnoittelu kannusti tekemään näitä varaavia sähkölämmitysjärjestelmiä 1990- ja 2000-luvuilla (Järventausta et al. 2015).

Lämpöpumppujen kulutusprofiili on hyvin tasainen lämmityskaudella. Mutta erityisesti ilmavesilämpöpumppujen sekä alimitoitettujen maalämpöpumppujen kulutusprofiilissa on havaittavissa korkeita kulutuspiikkejä, kun kylmällä kelillä ja suurella käyttöveden kulutuksella sähkövastukset joutuvat tuottamaan tarvittavan energian lämpöpumpun tehonpuutteesta johtuen. (Järventausta et al. 2015)

Lämpimän käyttöveden lämmityksen profiili on myös suoraan riippuvainen lämmitysjärjestelmästä. Varaavissa lämmityksissä käyttövesi lämmitetään esimerkiksi puulla tai sähköllä isompaan varaajaan, josta lämmintä vettä riittää pidemmäksi aikaa. Lämpöpumpuissa, kaukolämmössä sekä kattiloissa lämmintä käyttövettä lämmitetään kulutuksen mukaan, jolloin kulutusprofiili ajoittuu iltaan.

Sähkökiukaiden kulutusprofiili on suoraan suhteessa saunomisajankohtaan. Niin kutsutuissa ainavalmiissa kiukaissa sähkönkulutus on tasaisempaa, mutta niissäkin huipputeho ajoittuu saunomisajankohdalle. Tyypillinen sähkökiukaan teho on noin 6 kW.

5.2 Laitteiden vertailu volatiliteetin hyödyntämiseen

Kuten aiemmin käytiin läpi, kotitalouksissa on useita sähkölaitteita ja teoriassa myös yhtä monta kulutusjousto on soveltuvaa laitetta. Pientalon sähkölaitteet voidaan karkeasti jakaa käyttäjälähtöisiin kuormiin sekä termostaattisesti ohjattuihin kuormiin. Käyttäjälähtöiset kuormat ovat sellaisia, joihin laitteen käyttäjä vaikuttaa toimillaan, kuten pesukoneet, valaistus, tietokone ja sähköautot. Termostaattisesti ohjattuja kuormia ovat muun muassa lämmitys, käyttöveden lämmitys ja ilmastointi. (Vanage et al. 2023)

Sähkön hinnan volatilitteetti voi olla suurta lyhyelläkin (alle vuorokauden) aikajaksolla. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjälähtöiset kuormat eivät sovellu volatilitteetin hyödyntämiseen ilman käyttäjän aktiivista toimintaa. Käyttäjä joutuisi siis siirtämään ruoanlaiton, saunomisen tai pyykinpesun ajankohtaa. Näistä hyödynnettävin vaihtoehto on pyykinpesu, jonka voi ajoittaa edulliselle tunnille, mutta vertailtava aikajakso täytyy laskea pesuohjelman keston mittaisena jaksone. Lisäksi valaistusta voidaan himmentää noin 15-20 prosenttia ilman, että se vaikuttaa merkittävästi mukavuuteen (Vanage et al. 2021). Valaistuksen osuus on kuitenkin alle 3 prosenttia kokonaisenergiankulutuksesta, kuten esiteltiin kohdassa 5.1, joten siitä saatava hyöty on marginaalinen.

Käyttäjälähtöisiä kuormia on siis vaikeampi optimoida automaattisesti. Sen sijaan termostaattisesti ohjatut kuormat soveltuvat paremmin volatilitteetin hyödyntämiseen. Talon ja käyttöveden lämmityksessä lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla on mahdollista toteuttaa minuutti- ja tuntitaso joustoa. Varaavalla lämmitysmuodolla päästään tilanteeseen, että lämpöä ei tarvitse tuottaa suoraan kulutuksen tahdissa vaan lämmitystä voidaan siirtää jopa vuorokaudella volatilitteetin mukaan. (Honkapuro et al. 2020) Talon ja käyttöveden lämmityksessä volatilitteetin hyödyntämisen suuruuteen vaikuttaa siis varausmahdollisuuden koko ja lämmöntarpeen suuruus vuoden ajan mukaisesti.

Yleisimmät vesikiertoisten sähkölämmitysten varaajakoot ovat 500 - 3000 litraa. Mikäli kohteessa on lattialämmitys, voidaan varaajan lämpötila tiputtaa aina 30 asteeseen asti. Vastaavasti termostaatin yläraja voidaan nostaa 90 asteeseen, jolloin lämpötilaeroksi saadaan $dT = 60^{\circ}C$. Veden ominaislämpökapasiteetti on $c = 4,19kJ/kgK$. Näiden avulla saadaan teoreettinen energiamäärä, mikä varaajaan voidaan varastoida.

$$Q = cmdT \quad (5.1)$$

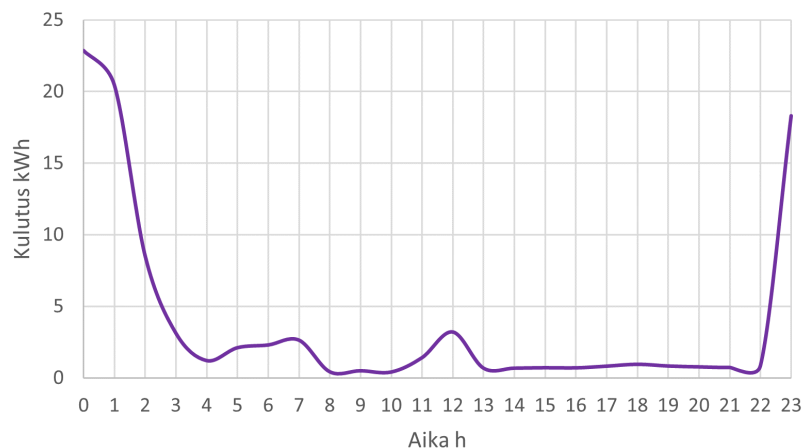
Kohteessa, jossa on 1500 litrainen varaaja, energiamäärä on $Q = 4,19(kJ/kgK) * 1500(kg) * 60(K) = 104,7(kWh)$. Tämä vastaa 150 neliöisessä talossa yhdestä kolmeen vuorokauden lämmitysenergian tarvetta riippuen ulkolämpötilasta. Riippuen varaajan eristyksien laadusta ja rakenteiden kyvystä varastoida energiaa, varausaika pitenee tai lyhenee. Seuraavaksi käydään esimerkkikohteen avulla läpi varaavan vesikiertoisen sähkölämmityksen potentiaali energiakustannusten optimoinnissa.

6. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä työssä tarkastellaan pientalon energiakustannusten vähentämistä sähkön hinnan volatiliteetin avulla. Työssä lasketaan numeerisesti Excel-laskentaohjelman avulla mahdollinen säästö käsittelemällä aikasarjaa sähkön SPOT-hinnoista sekä esimerkkikohteen kulutuksesta. Esimerkkikohte on Tampereella sijaitseva noin 150 m² omakotitalo, joka on rakennettu vuonna 2005 ja jossa on varaava sähkölämmitys. Vuosikulutus on ollut noin 30 000 kWh.

Esimerkkikohteen kulutustiedot saatiin tämän kandidaatintutkielman tekijän henkilökohtaisen sähkönsiirtosopimuksen avulla Tampereen Sähköverkko Oy:ltä. SPOT-hinnan aikasarja puolestaan saatiin Nordic Green Energy Oy:ltä ja niille tehtiin satunnaistarkastus Entso E:n transparency platform -sivuston avulla.

Laskennassa tehdään joitakin oletuksia yksinkertaistamaan laskentaa. Esimerkkikohteen varaaja on asetettu kytkeytymään päälle kello 22 jälkeen aikasiirto sopimusta hyödyntäen. Tämä nähdään hyvin kulutusprofiilista kuvaajan 6.1 mukaan. Tämän perusteella laskennassa tehdään oletus, että siirrettävissä oleva kulutus ajoittuu ajanjaksolle 22-07. Kello 22-07 välisenä aikana on kuitenkin muuta kulutusta, jota ei voida optimoida, mutta sen merkitys on laskennassa pieni ja lisäksi se kompensoi esimerkiksi käyttövesivaraajan jättämistä optimoinnin ulkopuolelle. Tätä virhettä pienennetään rajaamalla yhdeltä tunniltä siirrettävän kulutuksen minimiarvoksi 3 kW.



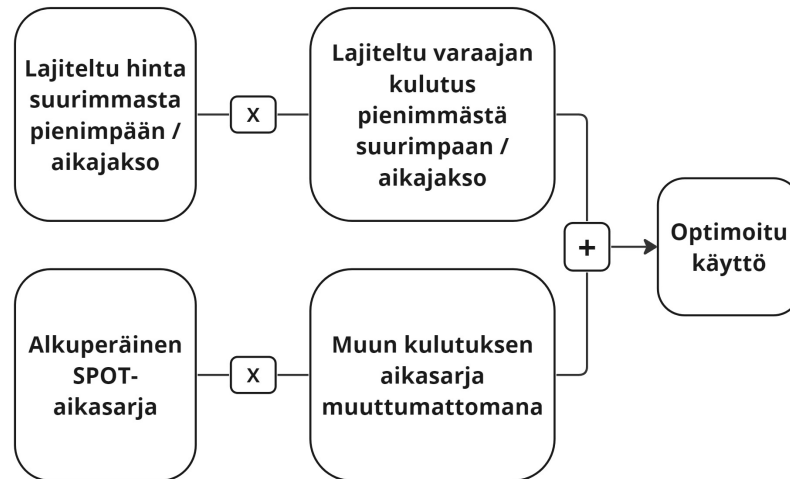
Kuva 6.1. Esimerkkikohteen kulutusprofiili 01.01.2023

	A	B	F	G
1			SÄHKÖN TUNTIHINTA €/MWh	Lajiteltu hinta
2	PVM	Aika	sis. Alv	€/MWh
3	01/01/2023	00 - 01	5,324	1;-1)
4		01 - 02	2,211	58,993
5		02 - 03	1,518	52,855
6		03 - 04	0,099	50,633
7		04 - 05	0,088	50,556
8		05 - 06	0,055	49,148
9		06 - 07	0,088	40,194
10		07 - 08	0,099	26,521
11		08 - 09	0,583	19,481
12		09 - 10	2,233	6,666
13		10 - 11	3,41	6,666
14		11 - 12	4,873	6,248
15		12 - 13	6,666	5,324
16		13 - 14	6,666	4,873
17		14 - 15	6,248	3,41
18		15 - 16	19,481	2,233
19		16 - 17	26,521	2,211
20		17 - 18	40,194	1,518
21		18 - 19	50,633	0,583
22		19 - 20	59,653	0,099
23		20 - 21	58,993	0,099
24		21 - 22	52,855	0,088
25		22 - 23	49,148	0,088
26		23 - 00	50,556	0,055

Kuva 6.2. LAJITTELE-funktion käyttö

Laskenta perustuu Excel-laskentaohjelman LAJITTELE-funktion käyttöön, joka esitellään kuvassa 6.2. Sen avulla sekä kulutustiedot että hintatiedot voidaan lajitella. Ensimmäisessä laskennassa tiedot lajitellaan vuorokauden sisällä niin, että kunkin vuorokauden hinnat järjestetään LAJITTELE-funktion avulla suurimmasta pienimpään. Kulutustiedoista erotellaan varaajan kulutukset edellä mainitun oletuksen mukaisesti ja ne järjestetään LAJITTELE-funktion avulla pienimmästä suurimpaan saman vuorokauden sisällä. Näin saadaan kunkin vuorokauden sisällä samalle riville järjestettyä suurin kulutus vastaamaan edullisinta hintaa. Samalla säilytetään alkuperäinen hinta-aikasarja, jonka avulla saadaan muun kulutuksen kustannukset laskettua. Optimoitu varaajan käyttö ja muu kulutus alkuperäisenä lasketaan yhteen ja näin saadaan optimoitu kokonaiskustannus, jota havainnollistetaan lohkokaaaviolla kuvassa 6.3.

Vuodelle 2023 tehdään myös laskenta, jossa oletaan talvikuukausina (joulukuukausi) varaajan pystyvän varaamaan yhden vuorokauden lämmöntarpeen niin kuin ensimmäisessä laskennassa, mutta kevään (maaliskuukausi) ja syksyn (syyskuukausi) kuukausina oletetaan varaajan pystyvän varaamaan kolmen vuorokauden lämmöntarpeen. Kesäkuukausina (toukokuukausi) laskenta puolestaan tehdään seitsemän vuorokauden ajanjaksolle. Laskenta perustuu samaan tapaan kuin ensimmäisessä tapauksessa, mutta nyt LAJITTELE-funktion avulla kulutus- ja hintatiedot lajitellaan yhden, kolmen ja seitsemän vuorokauden mukaan.



Kuva 6.3. Laskennan lohkokkaavio

Vuosittaisia kustannuksia eri sopimusmallien välillä verrataan toisiinsa. Laskelmat tehdään vuosille 2021, 2022 ja 2023, joille on laskettu myös keskiarvolliset kiinteähintaiset sähkö sopimukset, joihin optimoituja energiakustannuksia verrataan. Kaikille vuosille tehdään myös vertailtava tulos tasoittamalla jokaisen vuorokauden kulutus tasaiseksi. Se olisi lähellä tilannetta, jossa varausmahdollisuutta ei olisi, vaan tarve ja kulutus olisivat samanaikaisia.

Laskelmassa ei oteta huomioon sähkön kokonaishintaan vaikuttavaa verkkopalvelumaksua. Verkkopalvelumaksu on voimakkaasti riippuvainen jakeluverkkoalueesta, vaikka sopimusmallikin siihen vaikuttaa 3.1. Verojen suuruus ei vaikuta erotukseen optimoidun ja kiinteähintaisen sähkö sopimuksen energiakustannusten välillä.

7. TULOKSET

Tässä luvussa lasketaan pientalon energiakustannusten pienentämisen mahdollisuus sähköhinnan volatilitteettiä hyödyntämällä. Esimerkkikohteenä käytetään noin 150 m² omakotitaloa Tampereella, jossa on varaava sähkölämmitys ja vuosikulutus noin 30 000 kWh. Laskelmissa verrataan menetelmät kohdassa esitettyä tapaa laskea optimaalinen sähkön käyttö siirtämällä varaajan käyttö SPOT- hintojen mukaan edullisimmille tunneille. Taulukossa 7.1 on esitetty Excel-laskelman tulokset.

Kullekin vuodelle on esitetty omat vertailtavat tulokset. Esimerkkikohteen vuosikustannukset kussakin tilanteessa ovat esitelty toisessa sarakkeessa. Kullekin tapaukselle on laskettu keskimääräinen kilowattituntihinta sekä säästö verrattuna tilanteeseen, jossa energiakustannus muodostuu keskiarvollisen kiinteähintaisen sopimuksen mukaan.

Tuloksissa verrataan eri tilanteita kiinteähintaiseen keskiarvolliseen sopimukseen kullekin vuodelle. Tulokset kertovat siis hyödyn optimoinnista tämän suhteen. Mikäli nykyinen sopimus olisi kilowattituntihinnaltaan korkeampi, hyöty kasvaa sen mukaan ja laskee nykyisen sopimuksen ollessa edullisempi.

Tuloksista nähdään, että käyttämällä SPOT-hinnoittelua ja optimoimalla vuorokauden kulutusta edullisimpien tuntien mukaan, on vuosina 2022 ja 2023 voinut saada pienennettyä energiakustannuksia merkittävästi. Vuonna 2022 säästö on ollut 31 prosenttia ja vuonna 2023 jopa 51 prosenttia. Sen sijaan vuonna 2021 kustannukset olisivat olleet 22 prosenttia korkeammat verrattuna keskiarvolliseen kiinteähintaiseen sähkösopimukseen. Tämä johtuu selkeästi kiinteähintaisten sopimusten hitaasta noususta verrattuna reaaliaikaiseen pörssisähkösopimuksen hintaan. Volatilitteetin nopean voimistumisen seurauksena kiinteähintaisten sopimusten keskiarvohinnat nousivatkin yli kolminkertaiseksi vuodesta 2021 vuoteen 2022.

Esimerkkitapauksen kaltaisilla lämmitysmuodoilla on hyödynnetty yleensä kausisähkösopimuksia 3.2, mutta energiamaksujen osalta myös kausisähkösopimukset ovat merkittävästi kalliimmat kuin optimoimalla kulutusta pörssisähkö sopimuksen kanssa. Oletuksella, että vuosittainen keskiarvollinen hintaero kausisähkösopimuksen edullisen ja kalliimman ajanjakson välillä noudattaa hetkellisten tarjousten hintaeroa 3.1, olisi hyöty vain noin 5-10 prosenttia riippuen erityisesti sopimuksesta.

Koska laskelmassa ei ole otettu huomioon verkkopalvelumaksua, ei tulos ole suoraan

Taulukko 7.1. Tulokset

2023	Kustannus €/a	Hinta snt/kWh	säästö €/a	säästö %/a
Kiinteä hinta KA	3801	12,46		
Optimoitu kulutus	1871	6,13	1930	51
Ilman optimointia	2128	6,97	1673	44
Tasoitettu kulutus	2519	8,26	1282	34
Kausioptimointi	1693	5,55	2108	55
2022				
Kiinteä hinta KA	6197	20,59		
Optimoitu kulutus	4248	14,12	1949	31
Ilman optimointia	4950	16,44	1248	20
Tasoitettu kulutus	5533	18,38	665	11
2021				
Kiinteä hinta KA	2172	6,45		
Optimoitu kulutus	2641	7,84	-469	-22
Ilman optimointia	2912	8,65	-740	-34
Tasoitettu kulutus	3441	10,22	-1269	-58

yleistettävissä kaikille alueille Suomessa. Energiakustannuksien osalta tulos on suuntaa antava, mutta kokonaisenergiankustannuksiin vaikuttaa lisäksi jakeluverkkoyhtiön sopimusmalli (katso 3.1). Sähkölämmitteisissä omakotitaloissa usein kannattavin vaihtoehto on yösiirtosopimus, joka on hyvä vaihtoehto myös optimoidulle pörssisähkösopimusmallille. Pörssisähkön hinnat ovat keskimäärin edullisempia yöaikaan, jolloin myös yösiirtosopimusmallissa on edullisempi hinta.

Laskelmien tarkkuus on suuntaa antava. Sitä voitaisiin parantaa erottamalla tarkemmilla kriteereillä varaajan kulutus muusta kulutuksesta. Mittausdataa varaajan käytöstä voitaisiin myös hyödyntää lyhyeltäkin (kuukauden) aikajaksolta vertaamalla sitä kokonaiskulutuksen aikasarjaan, millä saataisiin tarkempia kriteereitä rajaukseen. Toisaalta myös käyttövesivaraajalle voitaisiin tehdä optimointia ja ottaa se mukaan tarkentamaan optimaalisinta tulosta. Realistinen laskenta lämminvesivaraajan osalta on kuitenkin haastavaa, sillä varaajan koko on yleensä pieni, kuten esimerkkikohteessa, ja lämpimän käyttöveden tarve ei ole niin ennustettavaa kuin talon lämmityksen tarve. Epätarkkuuksista huolimatta jo tällä tavalla tehty laskelma osoittaa, että optimoimalla sähkönkulutusta pörssisähköä hyödyntäen voi saada merkittävää taloudellista hyötyä.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteena oli selvittää pientalon mahdollisuudet pienentää energiakustannuksia sähköhinnan volatilitteettia hyödyntämällä. Työssä perehdyttiin sähköenergiajärjestelmän toimintaan ja miten se näkyy sekä vaikuttaa pientaloasukkaan energiakustannuksiin. Samalla selvitettiin sähkön hinnan muodostumisen mekanismit vähittäismarkkinoilla ja pientaloasukkaan mahdollisuudet vaikuttaa siihen. Pohjana esimerkkikohteen laskennalle perehdyttiin vielä omakotitalon energiakulutuskäytöksiin eri laitteiden osalta ja selvitettiin niiden edellytyksiä sähkönkäytön optimointiin. Tehdyn laskennan avulla, hyödyntäen kulutus- ja hintahistorian aikasarjoja, saatiin numeerinen arvio energiakustannuksien vähentämisestä sähkönkäytön optimoinnin avulla.

Sähköenergiajärjestelmä koostuu fyysisestä sähköverkosta, joka yhdistää tuotannon ja kulutuksen sekä sähkömarkkinoista, missä hinta sähköenergialle muodostuu. Kysyntä- ja tarjontaperusteinen hinnan muodostuminen mahdollistaa suuren vaihtelun eli volatilitteetin lyhyelläkin aikajaksolla. Eri sopimusmalleilla loppukäyttäjän on mahdollista vaikuttaa lopullisiin energiakustannuksiin. Esimerkkikohteen laskennan avulla vertailtiin optimoitua pörssisähkön käyttöä kiinteähintaisen sopimusmallin mukaan syntyneisiin energiakustannuksiin.

Omakotitalossa energiankulutusprofiileista, jotka ovat esitelty kohdassa 5.1, nähdään selkeästi, että energiankustannuksien optimointiin soveltuu parhaiten sähkölämmitteiset vesivaraajat. Ne voidaan helpoiten automatisoida ja niiden käyttöä voidaan varaajan koosta sekä sen hetkisestä lämmöntarpeesta riippuen helpoiten ajoittaa edullisimmille tunneille sähkön hinnan näkökulmasta. Optimoinnin hyöty kasvaa varaajan ja kohteen varausominaisuuksien kasvaessa.

Laskenta tehtiin Tampereella sijaitsevan, 2005 rakennetun ja noin 150 m² omakotitalon kulutustiedoilla. Kyseisessä talossa on 1500 litrainen vesivaraaja ja lattialämmitys. Kohteen vuosikulutus on ollut noin 30 000 kWh. Laskenta tehtiin Excel-laskentaohjelmalla ja merkittävin hyödynnetty funktio oli LAJITTELE-funktio. Sen avulla hinta- ja kulutustiedot voitiin kullakin päivällä lajitella vastaamaan toisiaan niin, että halvin hinta ja varaajan suurin kulutus saatiin kohtaamaan.

Laskennan tuloksien mukaan energiakustannuksia sähköenergiahinnan osalta oltaisiin voitu vähentää optimoidulla varaajan käytöllä vuonna 2022 31% ja vuonna 2023 jopa

51%. Yhtä optimointijaksoa kasvattamalla säästö olisi vuonna 2023 voitu kasvattaa 55 prosenttiin, mikä tarkoittaa esimerkiksi kohteessa 2108 €:n säästöä. Vertailu tehtiin kiinteähintaisen vuoden määräaikaisen sopimuksen keskiarvolliseen hintaan kullekin vuodelle.

Vuoden 2021 vastaava tulos oli negatiivinen, noin -22%. Tämä johtuu selkesti siitä, että energianhinta lähti nousuun vuoden 2021 lopulla, mikä ei näkynyt vielä kiinteähintaisissa sopimuksissa. Sen sijaan pörssisähkön hinta, jota optimoinnissa hyödynnetään, nousi ja se määräytyy suoraan sähkömarkkinoilla jokaiselle tunnille erikseen.

Laskennassa on otettu huomioon kokonaissähköhinnasta vain energianosuus. Vaikka siirtomaksuilla on merkittävä osuus verojen ja sähköenergian lisäksi, siirtomaksujen vaikutus kokonaisenergiakustannuksiin on riippuvaisempi kunkin kohteen jakeluverkkoalueesta ja kyseisen yhtiön verkkopalvelumaksuista. Sen vaikutus optimoituun energiakustannukseen riippu esimerkiksi aikasiirtosopimuksessa siitä, osuuko edullinen käyttötunti vastaavasti edulliselle siirtotunnille (yösiirtosopimuksessa välille klo 22-07). Tuloksia ei siksi voida suoraan yleistää koko Suomen alueelle, sillä verkkopalvelumaksujen ja sopimusmallien vaikutus voi kokonaisenergiakustannuksia vertailtaessa olla merkittävä tekijä.

Tulosten perusteella pörssisähkön avulla tehtyyn energiakustannusten optimointiin kannattaa etsiä keinoja. Uusiin lämmitysjärjestelmiin on nykyään sisäänrakennettu järjestelmä, joka optimoi käyttöä valiten pörssisähkön edullisimmat tunnit jolloin laite lämmittää kohdetta. Vanhoihin lämmitysjärjestelmiin yksinkertaisin tapa on etäohjattava rele, joka on ohjelmoitu optimoimaan energiankäyttöä pörssisähkön hintojen mukaan.

Kokonaishyödyssä täytyy kuitenkin ottaa huomioon optimointia suorittavan laitteen asennus ja materiaalikustannukset. Riskejä liittyy myöskin sähköhinnan volatiliteetin kehitykseen sekä laitteiden päivityksiin. Laitteen automaatio sekä ohjelman älykkyydet ovat merkittävässä roolissa, sillä maksimaalinen hyöty saadaan, mikäli ohjelma osaa huomioida kaikki vaikuttavat tekijät. Näitä tekijöitä ovat pörssisähkön hintaennusteen lisäksi muun muassa sääennuste, energiatarve ja sen ennuste, varaajan varaustilanne ja potentiaali sekä asukkaan käyttäytyminen.

LÄHTEET

- Abdelilah, R., Aboubakr, B., Ibtihal, A., Abdelhadi, R., Abdellatif, G., Zakaria, N. & Badr, I. (2021). *Design and implementation of an AI-based IoT-enabled Home Energy Management System*. Energy Reports, pp. 699–719.
- Dond, S., Hailond, L., Wallin, F., Avelin, A., Zhang, Q. & Zhixin, Y. (2019). *Volatility of electricity price in Denmark and Sweden*. Energy Procedia, pp. 4331–4337.
- Energiamailma (2023). *Sähkömarkkinat*. URL: <https://energiamailma.fi/energiasta/energian-tie-kotiin/sahkomarkkinat/> (viitattu 01. 11. 2023).
- Energiateollisuus (2023a). *Kulutusrjousto*. URL: <https://energia.fi/energiatietoa/asiakkaat/sahkoasiakkuus/kulutusjousto/> (viitattu 09. 10. 2023).
- (2023b). *Sähkönverohinnat*. URL: https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta (viitattu 09. 10. 2023).
- Energiavirasto (2023a). *Kuluttajatietoa*. URL: <https://energiavirasto.fi/kuluttajainfo> (viitattu 09. 10. 2023).
- (2023b). *Sähkön vähittäismarkkinat*. URL: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat> (viitattu 10. 10. 2023).
- eSett (2023). *Nordic Imbalance Settlement Handbook*. URL: <https://www.esett.com/app/uploads/2023/10/NBS-Handbook-v4.5.pdf> (viitattu 08. 10. 2023).
- Euroopan komission asetus (EU) (2017/2195). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32017R2195>.
- Fingrid (2023a). *Esittely*. URL: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/> (viitattu 04. 10. 2023).
- (2023b). *Sähkömarkkinat*. URL: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyysojhdanto-sahkomarkkinoinhin/> (viitattu 04. 10. 2023).
- Forsman, J., Närhi, J., Uimonen, H., Semkin, N., Miettinen, V. & Toivola, S. (2020). *Hiili-neutraalisuustavoitteen vaikutukset sähköjärjestelmään*. 4. Valtioneuvosto.
- Hakoniemi, E. (2022). *Aurinkoenergian tehokas hyödyntäminen omakotitalossa*. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202205016637>.
- Hartikainen, J. (2022). ”Teollisuuden uusi kulutusjousto voi vähentää talven sähkökatkojen riskiä”. *Helsingin Sanomat*. URL: <https://www.hs.fi/talous/art-2000009150730.html> (viitattu 09. 11. 2023).
- Hayes, A. (2023). ”Volatility: Meaning In Finance and How it Works with Stocks”. In: *Investopedia*. URL: <https://www.investopedia.com/terms/v/volatility.asp> (visited on 11/10/2023).
- Honkapuro, S., Sihvonen, V., Partanen J. and Harsia, P., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Järventausta, P., Repo, S., Reme, L. & Ketomäki, J. (2020). *Jousto 2035 visio – Ener-*

- giajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035*. Tekninen raportti. LUT. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-582-8>.
- Jardini, JA., Tahan, CMV., Gouvea, MR., Ahn, SU. & Figueiredo, FM. (2000). "Daily Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers". In: 15 (1), pp. 375–380. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=847276>.
- Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P. & Rautiainen, A. (2015). *Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille*. Tekninen raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0>.
- Kilpailuttaja (2023). *Ohjeet ja tuki*. URL: https://www.kilpailuttaja.fi/palvelut/tuki_ja_ohjeet/Sahkon_hinta_ja_kilpailuttaminen_kilpailuttajafi_palvelussa/sahkotuotteet_eli_tariffit/ (viitattu 11. 10. 2023).
- Koskela, J. (2016). *Sähköenergian varastoinnin hyödyntämismahdollisuudet kotitalouksien energian käytön hallinnassa Suomessa. Diplomityö*. Tampereen yliopisto. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201605254071>.
- Latvanen, O. (2020). *Sähkömittareiden mahdollistaman kulutusjouston tuottomahdollisuudet. Diplomityö*. Tampereen yliopisto. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202005064974>.
- Kiinteistö ja energia (2023). *Miksi sähkönsiirtoa ei voi kilpailuttaa?* URL: <https://www.kiinteistajaenergia.fi/component/content/article/miksi-sahkonsiirtoa-ei-voi-kilpailuttaa?catid=10&Itemid=101> (viitattu 04. 10. 2023).
- Morales, L. & Hanly, J. (2018). "European power markets—A journey towards efficiency". In: *Energy Policy* 116, pp. 78–85.
- Motiva (2023). *Lämmitystapojen vertailulaskuri*. URL: <https://lammitysvertailu.eneuvonta.fi/> (viitattu 10. 11. 2023).
- Mäkilä, V. (2019). *Siirtohintojen erot*. Turkulainen. URL: <https://www.turkulainen.fi/paikalliset/1397689> (viitattu 09. 10. 2023).
- Pelli, P. (2022). "Onko korkeiden sähkön hintojen syy vihreä siirtymä, markkinat vai Venäjä? Näin asiantuntijat arvioivat". *Helsingin sanomat*. URL: <https://www.hs.fi/politiikka/art-2000009050779.html> (viitattu 17. 10. 2023).
- Perkola, L. (2020). *Akuston hyödyntäminen rakennuksen sähkötehoaiippujen leikkaamisessa. Opinnäytetyö*. Tampereen ammattikorkeakoulu. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202005067592>.
- Rintamäki, T., Siddiqui, A. & Salo, A. (2017). "Does renewable energy generation decrease the volatility of electricity prices? An analysis of Denmark and Germany". In: *Energy economics* 62, pp. 270–282.
- Sähkömarkkinalaki (588/2013)*. URL: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Oidm46494958557312>.
- TEM (2019). *Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050*.

- Tilastokeskus (2023). *Vuoden 2021 kylmä sää nosti asumisen lämmitysenergian kulu-
tusta 7 TWh:lla*. URL: <https://stat.fi/julkaisu/ckfwmfrsg03h3015636dbwcpq> (viitattu
10. 10. 2023).
- Vaasansähkö (2023). *Hinnasto*. URL: [https://www.vaasansahko.fi/asiakaspalvelu/hinnat-
ja-ehdot/](https://www.vaasansahko.fi/asiakaspalvelu/hinnat-
ja-ehdot/) (viitattu 10. 10. 2023).
- Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (1133/2020)*. URL:
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20201133>.
- Vanage, S., Cetin, K., McCallay, J. & Wang, Y. (2023). "Grid-scale demand-side flexibility
services using commercial buildings lighting loads". In: *Energy and Buildings* 300. URL:
<https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378778823008617>.
- Vanage, S., Kunwar, N., Kawka, E. & Cetin, K. (2021). "Aggregation of Lighting Demand
Response for the Midcontinent Independent System Operator (MISO) Region". In:
ProQuest 127, pp. 484–491. URL: [https://www.proquest.com/docview/2699753695?
pq-origsite=gscholar&fromopenview=true](https://www.proquest.com/docview/2699753695?
pq-origsite=gscholar&fromopenview=true).
- Verohallinto (2023). *Sähkön valmistevero ja huoltovarmuusmaksu*. URL: