

Jon Palsinajärvi

SÄHKÖAUTOT ENERGIAVARASTOINA SUOMESSA

Kandidaatintutkielma
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Jon Palsinajärvi: Sähköautot energiavarastoina Suomessa
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Marraskuu 2023

Tutkielmassa selvitetään sähköautojen käyttömahdollisuutta energiavarastoina taloudellisessa hyötymistarkoituksessa. Ladattavien sähköautojen määrä Suomessa on kasvanut merkittävästi vuosikymmenessä ja niiden yleistymisen odotetaan jatkuvan. Sähköauto palvelee kuitenkin varsinaisessa käyttötarkoituksessaan eli kulkuvälineenä vain osan ajasta ja on suurimman osan yleensä kytkettynä sähköverkkoon. Ollessaan kytkettynä verkkoon sähköauto tarjoaa potentiaalista hyötyä energian varastoinnissa.

Sähkön kilowattituntihinta määräytyy sähkömarkkinoilla tuntiakohtaisesti ja hinnoissa saattaa paikoittain esiintyä suurta vaihtelua. Sähköauton omistaja voisi hyötyä hinnan vaihtelusta varastoimalla sähköä autonsa akkuun, kun hinta on matalalla ja myymällä sitä takaisin verkkoon hinnan ollessa jälleen korkeammalla. Tutkimuksen tavoite on selvittää edellä kuvatun sähkökauppamallin avulla rahallista arvonmuodostumista erilaisissa sähkönhintaskenaarioissa.

Työn alkuosassa perehdytään aiheita tarkastelemaan kirjallisuuteen ja olennaisiin tilastotietoihin. Tutkimus jatkuu käyttäjäprofiilin ja käyttötapausten määrittämisellä, joiden mukaisesti taloudellista hyötyä simuloidaan. Simulaatiota varten kehitettiin Matlab-algoritmi, joka on työn keskiössä. Algoritmiin syötetään tilastodataa sähköhinnoista eri testiviikoilta, jotka on tunnistettu ominaispiirteidensä, kuten vaihtelevien, korkeiden, matalien tai tavanomaisten sähkönhintojen perusteella. Arvonmuodostumista simuloivan algoritmin avulla saatuja tuloksia havainnollistetaan kuvaajilla. Tulosten perusteella tehdään päätelmiä siitä, minkälaisessa tilanteessa voittoa tavoitteleva sähkökauppa on kannattavaa.

Tutkimus osoittaa, että sähkönsiirrosta aiheutuvilla kustannuksilla on suuri merkitys sähkökaupan kannattavuuteen. Mikäli sähkönhintojen päivänsisäinen vaihtelu jää siirtohintoja matalammaksi tai sähkön markkinahinnat ovat yleisesti siirtohintoja matalampia, ei sähkökauppa ole kannattavaa. Tutkimus kuitenkin osoittaa voittoa syntyvän tietyissä tilanteissa, joissa sähkön päivänsisäisten markkinahintojen välinen erotus on suurempi kuin sähkönsiirrosta koituvat kustannukset.

Avainsanat: Sähköauto, energiavarasto, kilowattitunti, sähkökauppa, sähkön markkinahinta, sähkön siirtohintaa

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimusongelma.....	1
1.2 Tutkimuksen rajaus.....	2
1.3 Tutkimuksen rakenne.....	2
2. SÄHKÖAUTO OSANA SÄHKÖVERKKOA.....	3
2.1 Autokannan sähköistyminen	3
2.2 Kaksisuuntaisen latausaseman käyttö	4
2.3 Sähkömarkkina Suomessa.....	6
3. TYÖN VISIOINTIA TUKENEET TIEDOT.....	7
3.1 Selvitys sähköautojen käytöstä verkon reguloinnissa	7
3.2 Julkiset tilastot.....	8
3.3 Sähköauton optimoidun latauksen simulointi.....	8
3.4 Sähkönsiirtosopimukset Suomessa.....	9
4. SÄHKÖKAUPAN SIMULOINTIMALLI	11
5. HAVAINNOT JA TULOKSET	14
5.1 Hintojen esittäminen kuvaajien avulla	14
5.2 Testiviikko 1: Volatiilit sähkön hinnat	15
5.3 Testiviikko 2: Korkeat sähkön hinnat talvella	16
5.4 Testiviikko 3: Negatiiviset sähkön hinnat	16
5.5 Testiviikko 4: Tavalliset sähkön hinnat kesällä	17
6. TULOSTEN MERKITYS JA ANALYYSI	19
6.1 Tulosten tapauskohtainen tulkinta	19
6.2 Tulosten luotettavuus ja yleistettävyys	21
7. YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET	24
LIITE: MATLAB ALGORITMI.....	26

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Ladattavien henkilöautojen määrä Suomessa</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2. Tulkintaopas kuvaajille</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3. Sähkön kauppahinnat viikko 21/2022</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 4. Sähkön kauppahinnat viikolla 50/2022</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 5. Sähkön kauppahinnat viikolla 21/2023</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 6. Sähkön kauppahinnat viikolla 28/2023</i>	<i>18</i>

1. JOHDANTO

Sähkökäyttöisten ajoneuvojen suosio on noussut Suomessa 2010-luvulta alkaen. Varsinaisen käyttötarkoituksensa, paikasta toiseen liikkumisen, lisäksi sähköautoissa on suhteellisen suuret sisäänrakennetut akustot. Näitä akustoja voitaisiin mahdollisesti hyödyntää sähköenergian puskurivarastoina sähkömarkkinan reguloinnissa. Tarkoituksena on selvittää olemassa olevan tiedon perusteella akustojen käyttöä energiavarastoina ja tästä mahdollisesti sähköauton omistajalle syntyvää taloudellista hyötyä. Tutkielma toteutetaan kirjallisuusselvityksenä, joka sisältää myös rahallista hyötyä simuloivan algoritmin. Kiinnostava kirjallisuuslähde oli etenkin Alec N. Brooks (2002) Kaliforniassa tekemä selvitys sähköautojen akkujen käytöstä liitännäispalveluna verkon reguloinnissa, joka oli kipinä myös tälle tutkimukselle.

1.1 Tutkimusongelma

Henkilöautojen käyttövoiman muuttuminen vähitellen fossiilisista polttoaineista sähkövoimaan, kuten ladattaviksi hybrideiksi tai täyssähköautoiksi, voi tarjota potentiaalista hyötyä energian varastoinnissa, minkä taloudellinen arvo voidaan määrittää sähkömarkkinoilla. Ladattavien sähköautojen akustot on mahdollista kytkeä osaksi sähköverkkoa kaksisuuntaisen latausaseman avulla (Audi AG 2021). Akustoa purkamalla ja lataamalla oikeina ajanhetkinä voitaisiin mahdollisesti tasapainottaa sähköverkossa luonnollisesti esiintyvää kysynnän ja tarjonnan vaihtelua ja hyötyä sähkön tuntihintojen eroista.

Koska henkilöautot ovat pysäköitynä suurimman osan päivästä, jopa noin 95 % ajasta (Ziemann 2018), voitaisiin niitä käyttää tuottamaan arvoa ja näin pienentämään auton omistamisesta syntyviä kustannuksia. Vuonna 2022 Suomessa oli liikennekäytössä 148 927 ladattavaa sähköllä toimivaa ajoneuvoa (Traficom 2023). Näiden ajoneuvojen yhteenlaskettu kapasiteetti energian varastoinnissa, olettaen keskimääräiseksi akun kapasiteetiksi 40 kWh (E.ON Energy 2023), riittäisi teoriassa kattamaan melkein puolet koko Suomen noin 12 000 MWh huipputuntien sähkön kulutuksesta (Fingrid 2023).

Sähkön hinta määräytyy sähköpörssissä kysynnän ja tarjonnan mukaan (Energiateollisuus 2016). Pelkistettynä kasvanut kysyntä nostaa sähkön hintaa ja lisääntynyt tarjonta laskee hintaa. Kyse on merkittävästä kansantaloudellisesta arvosta, mikäli huipputuntien

kulutuksesta tai vuodenaikojen vaihtelusta aiheutuvaa sähkön hinnan nousua pystyttäisiin tasaamaan sähköautoihin varastoidulla energialla.

1.2 Tutkimuksen rajaus

Työn keskeisin tavoite on selvittää, voidaanko sähköautoja käyttää tuottamaan lisäarvoa energian varastoinnilla Suomessa. Tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan sähköenergian varastoinnista ja optimoidusta lataamisesta syntyneitä oletettuja kustannussäästöjä ensisijaisesti suomalaisen yksittäisen talouden tasolla. Edellytyksiä toimintamallin soveltamisesta varsinaiseen käyttötarkoitukseen ei käsitellä tässä tutkielmassa. Työssä vertaillaan erilaisia toimintamalleja sähkön mahdollisimman kustannustehokkaan siirtotavan löytämiseksi.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Tässä työssä käytetään osittain samoja oletuksia, menetelmiä ja tuloksia kuin lähde-teksteissä. Aihepiiriä keskitytään kuitenkin tutkimaan vain Suomen olosuhteissa. Työn toisessa luvussa esitellään aiheen taustaa sähköautojen ja sähkömarkkinoiden näkökulmasta sekä niiden välistä yhteyttä. Kolmas luku hahmottaa tutkimusta tukeneita sekä innostusta herättäneitä teoksia ja tietoja. Neljännessä luvussa käsitellään toteutettua simulointimallia ja viidennessä luvussa esitetään erilaisia tapauksia sähköautojen liittämisestä osaksi verkkoa. Luvussa kuusi havainnoidaan ja tulkitaan eri tapauksien etuja ja tunnuspiirteitä sekä tehdään johtopäätöksiä. Viimeisessä luvussa muotoillaan yhtenäinen tutkimuksesta.

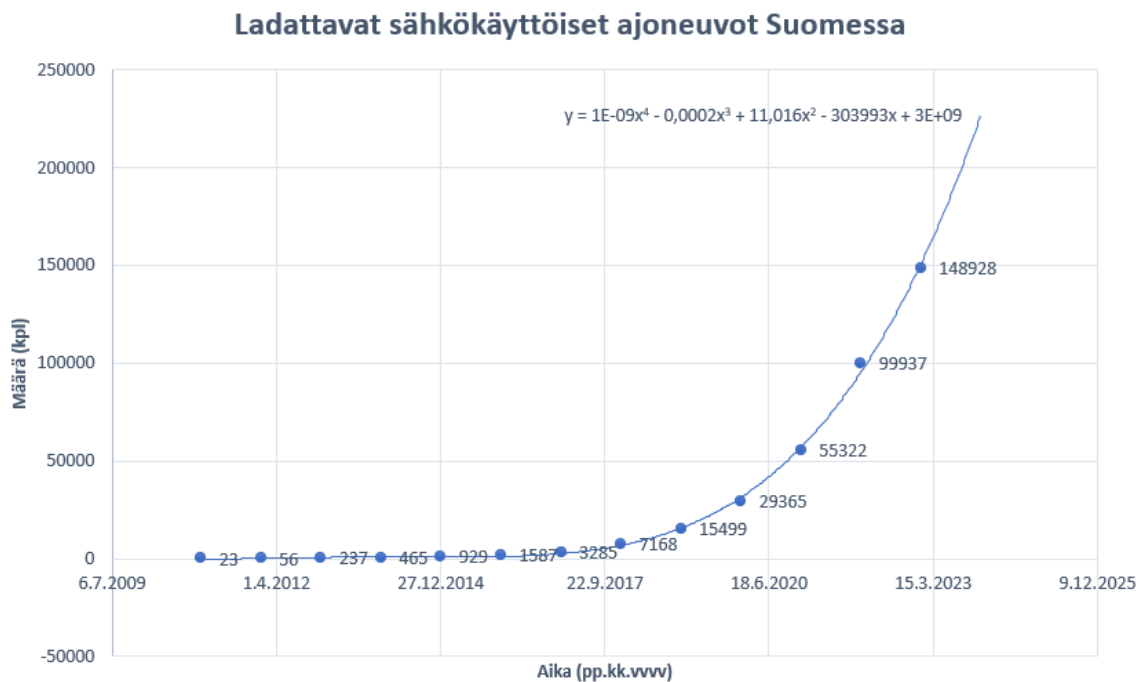
Tutkimuksessa on yhteneviä piirteitä Matti-Pekka Nuorvan (2019) tekemään kandidaattitutkielmaan, jota käsitellään tarkemmin luvussa 3.3. Poikkeavuutta kyseiseen työhön tässä työssä luovat viimeaikaiset erityiset vaihtelut sähkön hinnassa, joiden taloudellista vaikutusta pyritään tässä tutkielmassa kartoittamaan.

2. SÄHKÖAUTO OSANA SÄHKÖVERKKOJA

Sähköauton liittämiseksi osaksi sähköverkkoa on useita mahdollisuuksia. Perusajatus menetelmästä riippumatta on kuitenkin, että sähköauto toimisi liikkuvana virtalähteenä, josta sähköä voitaisiin tarvittaessa syöttää sitä kuluttaville laitteille. Sähköautojen kasvavat akkukoot ja niiden määrän lisääntyminen liikenteessä tarjoavat kokonaisuutena yhä suurempaa varastointimahdollisuutta energialle niin sähkömarkkinoilla kuin yksittäisten kotitalouksien käytössä.

2.1 Autokannan sähköistyminen

Ladattavien hybridautojen (PHEV) ja täyssähköautojen (BEV) määrä on lisääntynyt Suomessa voimakkaasti 2010-luvun alusta alkaen. Kun vuoden 2010 alussa sähköautoja kulki Suomen teillä vain 23, oli niitä vuonna 2020 liikennekäytössä jo 9 697 kappaletta. Vaikka ensimmäiset PHEV:t ilmestyivät Suomen tieliikenteeseen vasta vuonna 2012, oli määrä jo vuosikymmenen lopussa noussut 45 625 kappaleeseen. Hybridien määrä kasvoi siis 2010-luvulla huomattavasti voimakkaammin. Kaikkien ladattavien henkilöautojen määrä oli Suomessa vuoden 2022 lopussa jo 148 928 kappaletta, joista hybridejä oli 104 039 ja täyssähköautoja 44 889 kappaletta. (Autoalan Tiedotuskeskus 2023)



Kuva 1. Ladattavien henkilöautojen määrä Suomessa

Kuvan 1 kaaviolla on havainnollistettu ladattavien henkilöautojen kokonaismäärän kehitystä Suomessa Autoalan Tiedotuskeskuksen kokoaman vuosien 2010–2022 datan perusteella. Kaavioon on lisätty sovite, jota ekstrapoloimalla voidaan arvioida ladattavien henkilöautojen ylittävän 200 000 kappaleen kokonaismäärän vuoden 2023 aikana. Vuoteen 2030 mennessä sähköautojen määrän on ennustettu nousevan Suomessa yli 700 000 kappaleeseen (Turunen 2022).

2.2 Kaksisuuntaisen latausaseman käyttö

Ajoneuvon ollessa pysäköitynä ja kytkettynä kaksisuuntaiseen latausasemaan voidaan siihen joko ladata sähköenergiaa verkosta tai purkaa latausta takaisin verkkoon. Sähkön edestakaisissa siirroissa täytyy kuitenkin ottaa huomioon tehohäviöt latauksen aikana. Mikäli auton akkuun ladataan energiaa, joka myöhemmin puretaan takaisinpäin, on sähkönsiirrolle määritetty hyötysuhde korotettava nelioon, sillä siirto toteutetaan kahteen kertaan. Näin ollen hyötysuhteen ollessa esimerkiksi 90 % ja auton akkuun ostettaessa 20 kWh energiaa verkosta voidaan takaisin verkkoon purkaa ideaalitulanteessa enintään $\left(\frac{90}{100}\right)^2 \cdot 20 \text{ kWh} = 16,2 \text{ kWh}$ sähköenergiaa. Prosessin aikana siis menetetään 3,8 kWh:n edestä energiaa.

Kaksisuuntaisen latausaseman käyttö edellyttää yhteensopivaa ajoneuvoa, joita markkinoilla on kuitenkin nykyisin vain kourallinen. Ajoneuvoja, jotka tukevat kaksisuuntaista latausta ovat ainakin Nissan Leaf, Mitsubishi Outlander PHEV, MG ZS EV, BYD Atto 3, BYD Han EV, Hyundai Ioniq 5, Kia EV6, Kia Niro EV, Genesis GV60, Genesis GV70, Genesis GV80, Volkswagen ID.4 ja Ford F-150 Lightning. (Clean Energy Reviews 2023) (Zecar 2022) (ADT Solar 2022) (EV Database 2023) Malleista vain Nissan Leaf ja Ford F-150 Lightning tukevat ”Vehicle-to-home” (V2H) eli ajoneuvosta rakennukseen -latausta. Suurin osa malleista tukee vain ”Vehicle-to-load” (V2L) eli ajoneuvosta kuormaan -latausta. V2H-latauksessa ajoneuvosta siirretään kaksisuuntaisen latausaseman kautta virtaa paikallisesti esimerkiksi kodin sähköverkolle. Nissan käyttää tähän tarkoitukseen suunniteltua yleistä tasavirtalatausasemaa, kun taas Ford on kehittänyt oman vaihtovirtaa käyttävän yksinkertaisemman latausaseman omille malleilleen. V2L-latauksessa puolestaan ajoneuvosta siirretään virtaa yksittäisiin käyttökohteisiin ilman ulkoista kaksisuuntaista latausasemaa. Siirrettävä virta on tässä tapauksessa vaihtovirtaa.

Yleisesti sähköauton lataamiseksi on määritelty kansainvälisellä standardilla (IEC 61851-1:2019:en) neljä erilaista latausmoodia.

- Moodi 1: Sähköautoa voidaan ladata tavallisesta verkkovirtapistokkeesta korkeintaan 250 V jännitteellä 16 A yksivaihevirralla tai korkeintaan 480 V jännitteellä

16 A kolmivaihevirralla. Latauskaapelin tulee olla maadoitettu, mutta siinä ei ole erillistä suojalaitteistoa sähköiskujen varalta. Lataustapa on kielletty useassa eri maassa ja vain harvat latausasemien valmistajat tarjoavat tuotteita kyseiselle lataustavalle.

- **Moodi 2:** Sähköautoa voidaan ladata tavallisesta verkkovirtapistokkeesta korkeintaan 250 V jännitteellä 32 A yksivaihevirralla tai korkeintaan 480 V jännitteellä 32 A kolmivaihevirralla. Yleensä moodin 2 latauskaapelit on kuitenkin rajoitettu toimimaan 10 A yksivaihevirralla. Latauskaapelin tulee olla maadoitettu ja siinä tulee olla integroitu ohjainlaite, joka tarjoaa suojan vikavirtatilanteissa vaarallisia sähköiskuja vastaan. Lataustapaa käytetään tyypillisesti sähköautojen kotilataukseen ja se on tavanomaisin tapa ladata sähköautoa, sillä lähtökohtaisesti kaikkien uusien sähköautojen mukana tulee moodin 2 latauskaapeli.
- **Moodi 3:** Sähköauton latausaseman on oltava kiinteästi asennettuna sähköverkkoon. Latausaseman tulee tarjota vikavirtasuoja, kuten moodin 2 latauksessa. Yleensä moodin 3 latausasemat rajoittavat latausvirran 250 V jännitteellä 32 A yksivaihevirtaan tai 480 V jännitteellä 32 A kolmivaihevirtaan, vaikka lainsäädäntö ei suoraan määrittele suurinta sallittua virtaa. Tätä moodia käyttävät kaikki kiinteät kotilatausasemat ja kaupalliset latauspisteet, joista sähköautoja voidaan ladata vaihtovirralla.
- **Moodi 4:** Lataustapa mahdollistaa sähköauton lataamisen tasavirralla. Latausasemat ovat yleensä kokonsa puolesta isompia kuin vaihtovirralla toimivat latausasemat, sillä ne sisältävät muuntajan, jolla vaihtovirta voidaan muuttaa sähköautolle syötettäväksi tasavirraksi. Edistyksellisimmät tasavirralla toimivat latausasemat pystyvät lataamaan sähköautoa jopa 600 A virralla 1,5 kV jännitteellä (CHAdeMO 2023). Moodin 4 tasavirtalatausta kutsutaankin yleisesti ”pikalataukseksi”.

Kansainvälisten standardien yhtenäisyydessä on kuitenkin huomattavia puutteita, mikä yhdistettynä nopeaan teknologiseen kehitykseen on johtanut hyvin erilaisiin maakohtaisiin latausmenetelmiin ja -pistokkeisiin. Eroja on erityisesti tasavirralla toteutetussa pikalatauksessa. Esimerkiksi Japanissa käytössä oleva CHAdeMO-standardin mukainen pikalataus protokolla ja -pistoke ovat täysin erilaisia, kuin Euroopassa tavattavat CCS (Combined Charging System) -standardin mukainen protokolla ja Type 1 ja Type 2 pikalatauspistokkeet.

2.3 Sähkömarkkina Suomessa

Euroopan sähkömarkkinoilla sähkön tukkuhinta muodostuu kalleimman tuotantomuodon mukaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että uusiutuvista energianlähteistä saatavan sähkön kyetessä vastaamaan sähkön kulutukseen Euroopassa sähkö on edullista. Toisaalta tilanteessa, jossa tuotanto uusiutuville energianlähteillä on riittämätöntä ja sitä joudutaan paikkaamaan esimerkiksi maakaasulla, sähkön hinta nousee vastaamaan kaasuvoimalan tuotantokustannuksia. Vastaavanlainen tilanne tapahtui syksyllä 2022, kun Venäjän hyökkäyssodan seurauksena kohonnut maakaasun hinta alkoi lämmityskauden alkaessa Euroopassa siirtyä suoraan sähkön tukkuhintaan. (Nykänen 2022)

Sähkön hinta määräytyy vuorokausimarkkinoilla seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Näin ollen sähkön pörssihinta eli Spot-hinta on kuluttajan tiedossa jo hyvissä ajoin. Sähköauton omistaja, joka on liittännyt autonsa kaksisuuntaisen latausaseman avulla osaksi sähköverkkoa, voi siten suunnitella käymänsä sähkökaupan ennakoon ja hallitun lataamisen kautta hyötyä taloudellisesti.

Mikäli kysyntä ylittää tarjonnan sähköpörssissä, voidaan joutua ottamaan käyttöön varalla olevia sähkövoimaloita. Tämän kaltainen tilanne voisi syntyä esimerkiksi kylmänä talvipäivänä, mikäli kiinteistöjen lämmitykseen kuluvan energian tarve ylittää ennakoidun tarjolla olevan energian määrän. Sähköauton omistaja voisi mahdollisesti hyötyä reservimarkkinoista ja saada tuottoa juuri liittämällä ajoneuvonsa osaksi tehoreserviä.

3. TYÖN VISIOINTIA TUKENEET TIEDOT

Työn suunnittelua ja ideointia ovat edesauttaneet erilaiset teokset, tilastot ja ajatusmallit. Tässä luvussa on esitetty taustalla olevia tiedonlähteitä, joilla on ollut ajatuksia herättävää vaikutusta työn kannalta.

3.1 Selvitys sähköautojen käytöstä verkon reguloinnissa

Brooksin (2002) tekemä selvitys pohjautuu alun perin autovalmistajien väitteeseen, että sähköautojen valmistaminen on liian kallista. California Air Resource Board (CARB) hyväksyi vuonna 1990 toimeksiannon, jossa määritettiin tavoitteita päästöttömien ajoneuvojen valmistuksen aloittamiseksi vuodesta 1998 alkaen. Autovalmistajat tuottivat aluksi pienen määrän sähköllä toimivia ajoneuvoja, mutta alkoivat vastustaa lisävaatimuksia sähköautoista korkeiden valmistuskustannuksien vuoksi. CARB käynnisti selvityksen sähköautojen kustannusesteiden voittamiseksi, jota AC Propulsionin johtava tutkija Alec N. Brooks alkoi tutkia. (Brooks 2002)

Tutkimuksessa sähköautojen tarjoamat vaihtoehtoiset toiminnallisuudet on jaettu kahteen kategoriaan: paikalliset palvelut, jotka hyödyttävät sähköä ostajaa sähköauton ollessa kytkettynä verkkoon ja laajemman alueen palvelut, joita sähköauton kytkeminen osaksi verkkoa hyödyttää. Paikallisiin palveluihin kuuluvat toiminnallisuudet kuten kodin tai yrityksen varavirtalähteenä toimiminen, paikallisen jännitteen tasaaminen, ja kysyntäpiikkien tasoittaminen hinnan alentamiseksi. Laajemman alueen palvelut tarkoittavat verkon oheispalveluita, joita sähköverkko-operaattorit käyttävät pitääkseen verkon vakaana. Esimerkiksi tehoreservi on tämänkaltaisen oheispalvelu. Tutkimuksessa keskitytään tarkemmin oheispalveluun nimeltä verkon regulointi ja sen toteuttamiseen oikean sähköauton avulla. (Brooks 2002)

Tutkimuksessa testiympäristö luotiin jälkiasentamalla sähköautoon järjestelmä, joka mahdollisti virransyötön takaisin verkkoon samalla tavalla kuin autoa verkosta ladattaessa. Tutkimusskenaariossa oletettiin sähköauton olevan kytkettynä verkkoon suurimman osan ajasta, kun se ei ole muussa käytössä. Skenaarissa siis oletettiin, että auto kytketään kotona verkkoon työpäivän jälkeen seuraavaan aamuun asti eli noin 14 tunniksi. Tämän jälkeen autolla ajetaan töihin, jossa auto olisi kytkettynä verkkoon 9 tunnin ajaksi. Kyseisen skenaarion lisäksi otettiin mukaan tapaus, jossa sähköauto oli kytkettynä verkkoon 48 tunnin ajan. Yhteensä sähköauto oli kytkettynä osaksi verkkoa 227 tunnin ajan. (Brooks 2002)

Verkon reguloinnista sähköauton avulla muodostunut arvo laskettiin käyttäjäprofiiliin perusteella, jossa sähköauto on kytkettynä verkkoon 22,6 tuntia vuorokaudessa. Testiviikot valittiin vuoden 2001 joulukuulta sekä vuoden 2002 huhti- ja heinäkuulta Yhdysvaltojen sähkömarkkinoilta. Arvoa muodostui vuositasolle skaalattuna alhaisimmallaan \$3038 ja korkeimmallaan \$5038, mikä nykypäivän rahassa vastaisi euroissa alhaisimmallaan noin 4615 € ja korkeimmallaan noin 7653 € arvon syntymistä. Tulosten kannalta huomionarvoista oli myös, että testien aikana sähköauton akuston energian varastoinnin kapasiteetti kasvoi noin 10 %. (Brooks 2002)

Brooks toteaa, että "Vehicle-to-grid" (V2G) eli ajoneuvosta verkkoon -latauksen omaksumista helpottaa latausinfrastruktuurin kasvu. Mahdollisuus työpaikalla tapahtuvaan lataamiseen on myös tärkeää niin V2G:n kuin edullisempien, lyhyen kantaman, sähköautojen kannalta. Johtopäätöksenä tutkielmassa havaitaan sähköautojen liittäminen osaksi sähköverkkoa toteutettavissa olevana keinona luoda tuloja ja näin vähentää sähköauton omistamisen kuluja. Lopuksi ehdotetaan lisätutkimuksia V2G:n kehittämiseksi, mukaan lukien pilottikokeiden suorittamista, lainsäädännön muutoksia ja kokeita V2G:n vaikutuksista akkujen käyttöikään. (Brooks 2002)

3.2 Julkiset tilastot

Tässä työssä käytetään tiettyihin sähkönhintaan ja -kulutukseen liittyviin laskelmiin suomalaisen kantaverkkoyhtiö Fingridin tarjoamaa dataa. Fingrid tarjoaa avoin data -verkkopalvelun kautta keräämiään tietoja sähkömarkkinoista ja voimajärjestelmistä niitä hyödyntävien toimijoiden saataville. Fingridilla on käynnissä useita tutkimus- ja kehitysprojekteja, joita yhdistävänä teemana voidaan nostaa esille avoin datakuluttuuri, sillä se paitsi edesauttaa yhtiötä pääsemään tavoitteisiinsa myös edistää yhteiskunnallista tutkimusta. (Anteroinen 2020)

Työssä käytetään myös Nord Pool Spot -yhtiön verkkosivulta löytyvää dataa sähkön hinnoista Suomessa. Nord Poolin tilastoista saadaan sähkön historiahinnat tunnin tarkkuudella ja tätä ominaisuutta hyödynnetään sähkökaupan simuloinnissa.

3.3 Sähköauton optimoidun latauksen simulointi

Matti-Pekka Nuorvan (2019) tekemässä kandidaatintyössä "Sähköauto dynaamisena energiavarastona sähkömarkkinoilla" laaditaan algoritmi yksityisauton tietokoneen käymälle automatisoidulle sähkökaupalle. Kyseinen tutkimus herätti kiinnostusta suunnitella uusi algoritmi vastaavaan käyttötarkoitukseen ja kokeilla toimintaa erilaisilla sähkön hinnoilla pitäen silmällä viimeaikaista epävakaisuutta sähkömarkkinoilla. Sähkön hinta on

vuosien 2022 ja 2023 aikana vaihdellut rajusti. Nuorvan työssä todetaan sähköautojen olevan ihanteellisia ratkaisuja sähköverkon tukipalveluihin, kuten kuormansiirtoon. Sähköautojen käyttämisestä kuormansiirtoon koituvia hyötyjä olisivat muun muassa sähkön tuotannon ja -kulutuksen tasapainotus, sähköverkon rasituksen vähentyminen ja verkkomaksujen pienentyminen. Nuorva toteaa työssään, että sähköauton omistajan kannalta olisi hyödyllistä osallistua tasesähkö- ja reservimarkkinoille. Nuorva mainitsee myös sähkövarastolla käytävän sähkökaupan mahdollisena toimintamallina, jolloin hyödyllisintä liiketoiminta olisi suuria kalustoja omistaville tahoille.

3.4 Sähkönsiirtosopimukset Suomessa

Sähkön lopullista hintaa laskettaessa on otettava huomioon tuntikohtaisen markkinahinnan lisäksi myös sähkön siirrosta kuluttaja-asiakkaalle koituvat kustannukset. Kustannukset ovat korvausta jakeluverkonhaltijalle, joka huolehtii sähkön jakelusta ja siihen liittyvistä verkkopalveluista jakelualueellaan. Korvaukset vaihtelevat jakelualueesta ja jakeluverkonhaltijasta riippuen. Jakeluverkonhaltijoilla voi olla tarjolla useita erilaisia verkkopalvelutuotteita eli sähkönsiirtosopimuksia, joiden hinnat ja ehdot poikkeavat toisistaan. Yleisesti myös sähkö- ja arvonlisävero laskutetaan kaikissa sopimustyypeissä verkkopalvelutuotteen yhteydessä. Suomessa sähkövero veroluokkaan 1 kuuluvilla asiakkailla on 2,2530 snt/kWh ilman arvonlisäveroa ja 2,79372 snt/kWh arvonlisäveron kanssa. Veroluokkaan 1 kuuluvat pääasiassa kaikki kuluttaja-asiakkaat.

Tässä työssä käytetään esimerkkinä Tampereen alueella toimivaa paikallista jakeluverkonhaltijaa Tampereen sähköverkko Oy:ta. Tampereen sähköverkko Oy:n tuotetarjontaan kuuluvat kuluttaja-asiakkaille suunnatut yleissiirto-, aikasiirto-, kausisiirto- ja tilapäissiirto-sopimukset, joista asiakas voi valita tarpeeseensa sopivan ratkaisun. (Tampereen sähköverkko Oy 2023)

Yleissiirtosopimus on tarkoitettu pienehkön sähkönkäytön (alle 10 000 kWh/v), 0,4 kV jakeluverkkoon liittyneille, kotitalousasiakkaille. Yleissiirtosopimuksessa sähkön siirtohintaa muodostuu perusmaksusta, energiamaksusta ja sähköverosta. Perusmaksu on kuukaudessa maksettava kiinteä summa sähkönsopimuksesta, joka riippuu etusulakkeen koon mukaan. Energiamaksun suuruus puolestaan riippuu sähkön kulutuksesta ja määräytyy käytettyjen kilowattituntien mukaan. Yleissiirtosopimuksessa energian siirtomaksu (snt/kWh) pysyy vakiona vuorokauden ajasta riippumatta.

Aikasiirtosopimus on ensisijaisesti tarkoitettu sähkölämmitysasiakkaille, joilla valta osa sähkönkulutuksesta suuntautuu yöajalle eli klo 22–07 väliselle ajalle Suomen virallista aikaa. Aikasiirtosopimuksessa perusmaksu on yleissiirtosopimusta hintavampi, mutta

yöenergiamaksu on huomattavasti edullisempi. Päiväenergiamaksu puolestaan on hie-
man yleissiirtosopimuksen energiamaksua kalliimpi.

Kausisiirtosopimus on tarkoitettu asiakkaille, joilla sähkönkäyttö painottuu kesäajalle ja
on verrattain suurehkoa. Sopimuksessa on määritelty kiinteä perusmaksu, joka on suu-
rempi kuin edellä mainituissa sopimustyypeissä sekä vuodenajasta riippuvat käytön mu-
kaan muuttuvat energiamaksut. Sähkö on kalliimpaa talviarkipäivinä eli 1.11–31.3 väli-
sen ajan arkipäivinä ja edullisempaa muina ajankohtina.

Tilapäissiirtosopimus on tarkoitettu lyhytaikaiseen käyttöön ilman muuta sopimista kor-
keintaan kahdeksi vuodeksi. Hinta koostuu perusmaksusta, joka nousee merkittävästi
etusulakkeen koon kasvaessa sekä energiamaksusta, joka on vakio ajankohdasta riip-
pumatta. Sähkövero lisätään jokaisessa esitellyssä sopimuksessa lopulliseen hintaan.

4. SÄHKÖKAUPAN SIMULOINTIMALLI

Tutkimus toteutetaan luomalla MATLAB algoritmi, jolla simuloidaan sähkökauppaa ja siitä syntyneitä voittoja/tappioita. Tutkimustapauksessa valitaan autoksi Nissan Leaf e+, sillä se tukee V2H-latausta hyvinkin laajalla valikoimalla eri valmistajien latausasemia. Auto on varustettu 350 V:n ja 59 kWh:n litiumioniakulla (Nissan Nordic Europe Oy 2023), jota voidaan ladata moodin 3 kiinteällä latausasemalla 6,6 kW:n vaihtovirralla. Akkua on myös mahdollista ladata 100 kW:n CHAdeMO-pikalatauksella latauksen tapahtuessa tasavirralla.

Latauksen hyötysuhde tulee ottaa myös algoritmissa huomioon. Hyötysuhde riippuu merkittävästi ulkoilman lämpötilasta (Trentadue, G., Rocha Pinto Lucas, A., Otura Garcia, M., Pliakostathis, K., Zanni, M. ja Scholz, H., 2018). Trentaduen et al. tekemässä tutkimuksessa, jossa mitattiin eri latausteknologioiden hyötysuhteita äärimmäisissä käyttölämpötiloissa, todettiin hyötysuhteiden vaihtelevan 39 % ja 93 % välillä. Tutkimuksessa latausteho rajoittui kuitenkin korkeintaan 50 kW. Korkeammilla lataustehoilla taas käytetään korkeampia jännite-eroja, joilla puolestaan voidaan parantaa hyötysuhdetta. Tutkimuksen mukaan hyötysuhteen arvot asettuvat kuitenkin pääosin 90 % ympärille luonnollisissa olosuhteissa. Asetetaan tätä tutkimusta varten algoritmin hyötysuhde mukailemaan oheista 90 % arvoa.

Nissan Leaf e+ sähköauton yhdistetty nimelliskulutus on 17,8 kWh / 100 km (Nissan Nordic Europe). Oletetaan päivätyössä käyvän sähköautoilijan työmatkan pituudeksi 25 km suuntaansa, jolloin kokonaismatkaksi saadaan 50 km. Tällöin energiaa kuluisi teoriassa 9,25 kWh. Suomen olosuhteissa kulutus on yleensä suurempi, etenkin talvisaikaan, kuin WLTP-mittausolosuhteissa, joten lisätään varmuuskerroin ja kerrotaan kulutus kahdella. Kulutus päivän aikana olisi siis 18,5 kWh, mutta pyöristetään tämä vielä ylöspäin 19 kWh. Sähköauton akkua tulisi siis ladata 19 kWh verran auton ollessa kytkettynä kotilatausasemaan. Oletetaan työpäivän pituudeksi 8 tuntia ja työmatkoihin kuluva ajaksi 1 tunti päivässä. Auto olisi tässä tapauksessa kytkettynä kotilatausasemaan 15 tuntia päivässä. Auto on siten latauksessa esim. klo 16–07 välisen ajan.

Tutkimuksessa käytetään oletusta, että sähköauto voidaan liittää osaksi sähköverkkoa ja sähköä voidaan siirtää latausjärjestelmän tehon rajoissa niin ajoneuvoon kuin takaisin verkkoon. Tutkimuksessa tehdään oletus, että sähköautoa käytetään sekä päivittäisiin ajoihin että voittoa tavoittelevaan sähkökaupankäyntiin. Päivittäiseksi ajomatkoihin kuluva energiaksi määritellään 19 kWh, millä voidaan saavuttaa valmistajan ilmoittaman

nimelliskulutuksen mukaan 106,4 kilometrin kantama. Oletetaan myös, että 59 kWh akusto voidaan jakaa eri lohkoihin siten, että päivittäisajolle on oma 19 kWh lohko ja sähkökaupalle oma 40 kWh lohko. Tekniseen toteutukseen ei oteta kantaa tässä tutkielmassa, sillä työ keskittyy vain hahmottelemaan teoreettista tapaa hallita sähköautoilun kustannuksia.

Erilaiset sähkönsiirtoa rajoittavat tekijät on huomioitu ja ne on määritelty parametreina algoritmin alussa. Parametreja ovat sähkökauppaan käytettävissä oleva akun kapasiteetti, latausteho, hyötysuhde, kokonaisverkko-aika, latausaika päivittäistä ajoa varten, sähkökauppaan käytettävissä oleva verkko-aika sekä sähkökauppaa käytävien päivien määrä viikossa. Sähkökaupankäynti on suunniteltu toteutettavaksi siten, että sähkön kokonaiskustannukset jäisivät mahdollisimman pieniksi. Sähkökaupankäynti ajoitetaan viikon jokaiselle arkipäivälle klo 16–07 välille. Suuren osan latauksesta ajoituessa yöajalle, valitaan siirtosopimustyyppiä aikasiirtosopimus. Aikasiirtosopimuksessa klo 22–07 välillä tapahtuva sähkönsiirto on halvempaa ja maksaa Tampereen sähköverkon verkkopalveluhinnaston mukaisesti 1,3268 snt/kWh ja lisäksi veroluokan 1 mukaisen sähköveron 2,79372 snt/kWh. Valitusta latausaikavälisestä päiväaikaan sijoittuu klo 16–22 aikaväli, jolloin päiväenergiamaksu on 3,10 snt/kWh ja luokan 1 sähkövero.

Algoritmissa tarkastellaan sähkönsiirtoa vuorokausitasolla, jolloin on loogista aloittaa tarkastelu vuorokauden vaihteesta eli klo 00 eteenpäin. Tämän perusteella asetetaan sähköauton vuorokausilatausajaksi klo 00–07 väliset tunnit ja klo 16–00 väliset tunnit. Sähkökaupan tuotto määritellään viikkotasolla käyttäen kuitenkin vain arkipäiviä laskennassa. Viikonloppuisin oletetaan, että sähköauto on muussa määrittelemättömässä käytössä.

Simulointimalliin otetaan mukaan neljä eri testiviikkoa eri vuodenaajoilta, jolloin sähkön markkinahinnat ovat olleet toisistaan poikkeavia. Testiviikoilla on havaittavissa tiettyjä ominaispiirteitä, kuten talvisähkön hintoja edustavalla vuoden 2022 viikolla 50, jolloin sähkön hinnat olivat poikkeuksellisen korkeita. Viikon aikana sähkön hinta kävi jopa 0,66 €/kWh. Vastapainoksi on esitelty viikko 28 vuodelta 2023, jolloin kesäkauden sähköhinnat olivat verrattain tavalliset. Lisäksi tutkimukseen on otettu mukaan poikkeuksellinen vuoden 2023 viikko 21, jolloin sähköhinnat painuivat negatiiviselle pitkin viikkoa. Tästä vuosi taaksepäin on esitelty vuoden 2022 viikko 21, jolloin sähköhinnat olivat viikkotasolla tarkasteltuna suhteellisen volatiileja. Erilaisilla testiviikoilla pyritään saavuttamaan poikkeavia tuloksia, joille voidaan myöhemmin suorittaa analyysia.

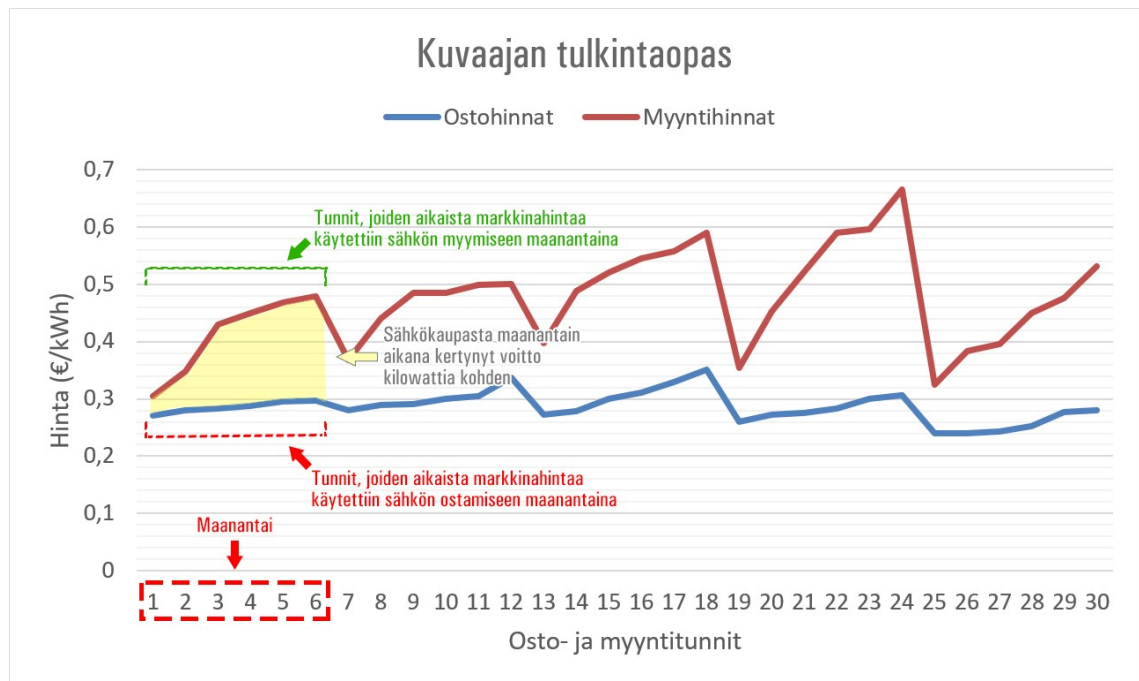
Taulukko 1. Simulaatiossa käytetyt alkuparametrit

Parametrin nimi	Arvo	Selitys
Akun kapasiteetti	40 kWh	Nissan Leaf e+ sähköauton jäljelle jäävä akun kapasiteetti päivän ajoihin kuluvan 19 kWh kapasiteetin jälkeen
Latausteho	6,6 kW	Moodin 3 latausaseman teho
Hyötysuhde	0,90	Sähköauton ja latausaseman välillä tapahtuvan energiansiirron hyötysuhde
Verkko aika	15 h	Kokonaisaika, jonka auto on kytkettynä verkkoon päivän aikana
Latausaika	3 h	Aika, joka kuluu sähköauton lataamiseen päivittäisen ajomatkan kattamiseksi
Tarkastelu aika	5 d	Tarkasteluväli ajoittuu arkipäiville, siis maanantaista perjantaihin
Sähkövero	2,79372 snt/kWh	Sähkövero Suomessa, joka huomioidaan sähkön siirrosta aiheutuissa kuluissa
Sähkön yö hinta	1,3268 snt/kWh	Sähkön kilowattituntikohtainen siirto hinta yö aikaan (klo 22–07) aikasiirtosopimuksessa
Sähkön päivä hinta	3,1 snt/kWh	Sähkön kilowattituntikohtainen siirto hinta päivä aikaan (klo 07–22) aikasiirtosopimuksessa

5. HAVAINNOT JA TULOKSET

Luvussa on esitelty Matlabilla suoritetulla simulointimallilla saatuja tuloksia ja vertailtu niitä testitapauksien esitietoihin. Tapaukset on tunnistettu juuri esitietojen, kuten korkean tai matalan sähkönhinnan perusteella. Tuloksia on havainnollistettu sähkön kauppahinnoista laadituilla kuvaajilla.

5.1 Hintojen esittäminen kuvaajien avulla



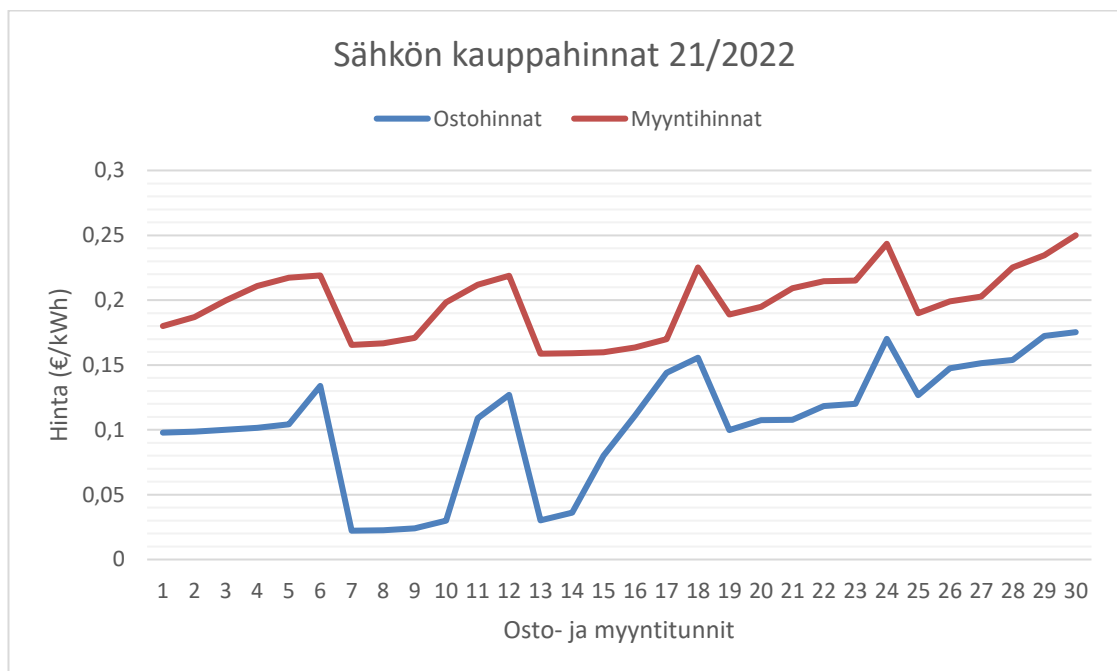
Kuva 2. Tulkintaopas kuvaajille

Ostetun ja myydyin sähkön tuntihintoja on havainnollistettu samantapaisilla kuvaajilla jokaisen testiviikon osalta. Kuvaajassa huomionarvoista on, että x-akseli ei ole kronologisesti etenevä aika-akseli. X-akseli kuvaa sähkökaupan tapahtumatunteja koko viikon ajalta, jolloin 30 tunnin mittainen akseli voidaan jakaa viikon arkipäiville 6 tunnin osissa. Tällöin ensimmäiset 6 tuntia kuvaavat maanantaina käytyä sähkökauppaa, tunnit 7–12 tiistaina käytyä sähkökauppaa ja niin edelleen. Jokaisen päivän osalta on siis 6 tuntia, kun sähköä ostetaan ja 6 tuntia, kun sähköä myydään. Y-akselilla on esitetty sähkön hinnat kilowattituntia kohden. Kuvassa näkyvien osto- ja myyntihintoja esittävien graafien integraalien erotuksesta voidaan laskea viikon aikana syntynyt tuotto kilowattia kohden ennen sähkönsiirtomaksua ja sähköveroä.

5.2 Testiviikko 1: Volatiilit sähkön hinnat

Tutkimustapauksessa selvitettiin viikon aikana sähkökaupasta syntyvää voittoa/tappiota, kun sähkön hintojen vaihtelu on suurta. Testiviikoksi valittiin viikko 21/2022. Nord Pool -yhtiön tilastojen mukaan arkipäivien 23.–27.5.2022 sähkön hintojen keskiarvo oli 0,1589 €/kWh ja viikon alhaisin hinta oli tiistaina 24.5 0,0214 €/kWh. Hintavinta sähkö oli torstaina 26.5, jolloin hinta oli 0,2550 €/kWh. Hintapoikkeama keskiarvosta on viikon aikana siis karkeimmillaan +60/-87 %. Prosentuaalisesti heilunta ei ole merkittävää, mutta euromääräinen vaihtelu oli verrattain suurta.

Simulointialgoritmin tuloksena sähkön oikea-aikaisella ostolla ja myynnillä olisi arkiviikon lopussa saavutettu 222,58 € voitto. Viikkotuotoksi luku on melko korkea, mikä selittyy pääosin korkeilla sähkön hinnan euromääräisillä vaihteluilla. Tämä mahdollistaa sähkön ostamisen ja varastoimisen akkuun tuntihinnan ollessa alhainen sekä voitollisen myynnin, kun sähköä puretaan akusta tuntihinnan ollessa korkealla.



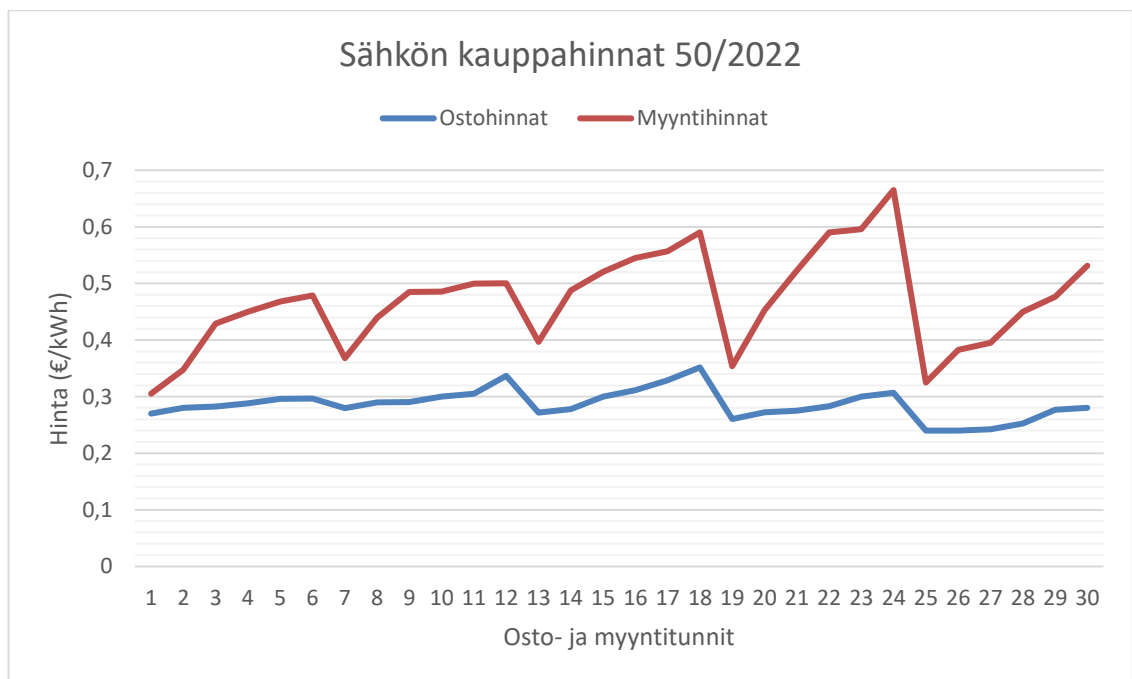
Kuva 3. Sähkön kauppahinnat viikko 21/2022

Kuvaajassa näkyy sähköhintakehitys vuoden 2022 viikon 21 aikana ostettujen ja myyjien tuntien osalta. Sähköautoon ladataan viikon aikana 30 tuntia energiaa ja puretaan 30 tuntia siten, että päivittäinen sykli on 6 tuntia latausta ja 6 tuntia purkua. Lataussähköenergian hinta on kuvattu sinisellä ja purkusähköenergian hinta punaisella käyrällä. Mahdollinen voitto voidaan laskea käyrien integraalien erotuksesta, mutta tästä täytyy vielä vähentää sähkön siirtomaksu ja sähkövero ostettaessa sähköä, jotta todellinen tuotto saadaan selville.

5.3 Testiviikko 2: Korkeat sähkön hinnat talvella

Seuraavassa tapauksessa selvitettiin sähkökaupan tuottamaa tulosta talviweekolla 50/2022, jolloin sähkön tuntikohtaiset hinnat olivat paikoin hyvin korkeita. Testiviikolla sähkön hinta vaihteli välillä 0,1048 €/kWh – 0,6650 €/kWh. Sähkön hinta oli korkeimmillaan alkuviikosta ja tasoittui loppuviikkoa kohti. Arkipäivien 12.–16.12.2022 sähkönhintojen keskiarvo oli 0,4109 €/kWh ja hinta poikkesi keskiarvosta viikon aikana +62/-74 %.

Algoritmin tuloksena viikon aikana käydylle sähkökaupalla olisi saavutettu 115,54 € voitto. Tuotto ei ole yhtä korkea kuin testiviikon 1 tapauksessa, mutta kuitenkin positiivinen, joten sähkökaupan käyminen weekolla olisi ollut kannattavaa. Suhteellisen voitokas kauppa selittyy myös tällä weekolla sähkön hintojen kohtalaisella euromääräisellä vaihtelulla.



Kuva 4. Sähkön kauppahinnat weekolla 50/2022

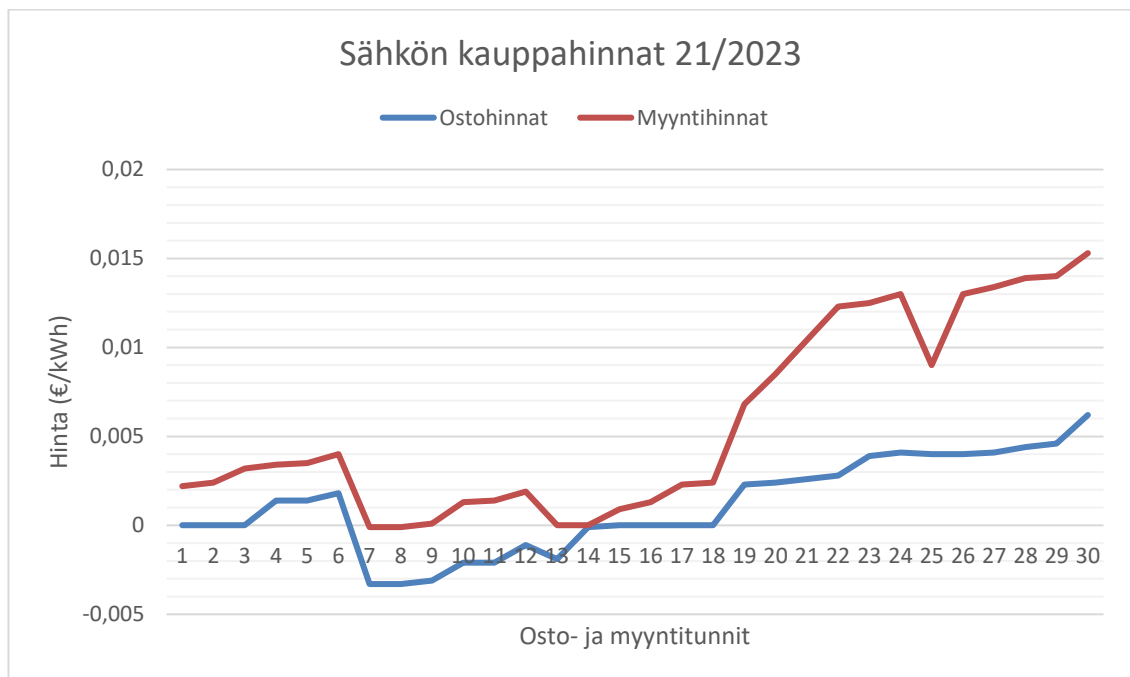
Kuvaajasta nähdään sähkönhintakehitys vuoden 2022 weekon 50 aikana ostettujen ja myytyjen tuntien osalta. Kuten kuvassa 2, sähköauton akkua ladataan ja puretaan 30 tuntia weekossa.

5.4 Testiviikko 3: Negatiiviset sähkön hinnat

Vuonna 2023 weekolla 21 sähkön hinnat painuivat negatiiviselle joinakin tunteina. Ilmiö on harvinainen ja johtuu siitä, että sähköstä on tällöin ylitarjontaa eikä kaikkea sähköä saada

välttämättä käyttöön. Viikolla sähkön hinta kävi alimmillaan -0,0050 €/kWh ja korkeimmillaan sähkö maksoi 0,0881 €/kWh. Sähkö oli siis edullista koko viikon ja välillä jopa ilmaista. Sähkön hintojen keskiarvo aikavälillä 22.–26.5.2023 oli 0,0082 €/kWh. Hinta- poikkeama keskiarvosta vaihteli välillä +1074/-161 %. Prosentuaalisesti heilunta oli hyvin suurta vaikkakin todellisuudessa kyse oli vain muutamista senteistä kilowattituntia kohden.

Algoritmin tuloksena viikon tuotoksi saatiin -188,01 €. Sähkökauppa viikolla olisi siis ollut tappiollista. Sähkön ostohinnat muodostuivat myyntihintoihin nähden viikolla korkeiksi hintaan lisättävien sähkön siirtomaksun ja sähköveron myötä, jotka saattoivat moninkertaistaa sähkön ostohinnan. Myynnissä siirtohintaa ei saa takaisin, joten sähköä olisi myyty huomattavasti halvemmalla kuin ostettu.



Kuva 5. Sähkön kauppahinnat viikolla 21/2023

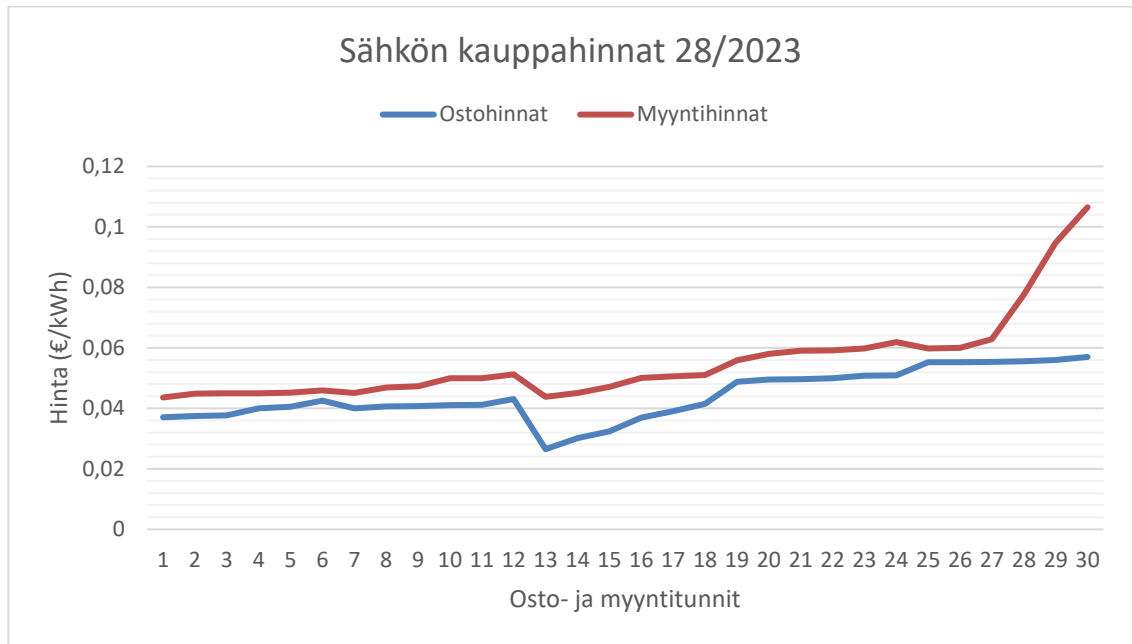
Kuvaajasta nähdään sähköhintakehitys vuoden 2023 viikon 21 aikana ostettujen ja myytyjen tuntien osalta. Kuten kuvissa 2 ja 3, sähköauton akkua ladataan ja puretaan 30 tuntia viikossa.

5.5 Testiviikko 4: Tavalliset sähkön hinnat kesällä

Viimeisenä testiviikkona on suhteellisen tavallisia kesäkauden sähköhintoja sisältävä viikko 28 vuodelta 2023. Sähkö maksoi halvimmillaan 0,0223 €/kWh ja kalleimmillaan

0,1065 €/kWh. Sähkön hintakehitys oli verrattain tasaista viikon aikana ja hintojen keskiarvo aikavälillä 10.–14.7.2023 oli 0,0508 €/kWh. Hinnat poikkesivat keskiarvosta enintään +210/-56 %.

Tulokseksi sähkökaupasta saatiin -164,24 €. Sähkökauppa ei siis olisi ollut kannattavaa viikolla. Tappiota selittää tässä tapauksessa jälleen sähkön ostohintaan lisättävä kiinteä siirtomaksu ja sähkövero, mikä matalilla sähkön hinnoilla kasvattaa hintaa merkittävästi pelkästä spot-hinnasta.



Kuva 6. Sähkön kauppahinnat viikolla 28/2023

Kuvaajasta nähdään sähkönhintakehitys vuoden 2023 viikon 28 aikana ostettujen ja myytyjen tuntien osalta. Kuten kuvissa 2, 3 ja 4, sähköauton akkua ladataan ja puretaan 30 tuntia viikossa.

6. TULOSTEN MERKITYS JA ANALYYSI

Luvussa on havainnoitu saatuja tuloksia tapauskohtaisesti ja tunnistettu toistuvia elementtejä tapausten välillä. Tämän jälkeen on esitetty taulukoituna kooste tuloksista ja niiden pohjalle perustetuista johtopäätöksistä. Lopuksi on suoritettu pohdintaa tulosten todenmukaisuudesta.

6.1 Tulosten tapauskohtainen tulkinta

Ensimmäisellä testiviikolla saavutettu voitto oli selvästi suurin ollen 222,58 €. Kyseisessä tapauksessa sähkön hinnat oli luokiteltu volatilleiksi, mikä voidaan havaita myös kuvasta 2 siten, että sähkön lataus- ja purkuhinnat poikkesivat nähtävästi toisistaan läpi viikon. Tämä tarkoittaa, että sähkön hintojen päivän sisäiset erot olivat suuria jokaisena päivänä. Tämä puolestaan on mahdollistanut päivän sisäisen sähkön oston edullisesti ja vielä saman päivän aikana sähkön myynnin korkeammalla hinnalla, jolloin kaupankäynti on päivän aikana voitollista. Kuvasta 2 voidaan myös päätellä kaupankäynnin olleen tuottavaa melko tasaisesti koko viikon ajan. Sähkön siirtomaksun ja sähköveron ollessa kiinteitä vähennyksiä tuotosta, on sähkön hintojen erotuksesta saatava tuotto oltava riittävän korkea, jotta kokonaistulos olisi positiivinen. Ero testiviikolla halvimman ostetun ja kalleimman myydyn tunnin välillä oli 0,2278 €/kWh. Kilowattituntikohtainen vähennys tuntikohtaisesta voitosta vaihtelee aikasiirtosopimuksessa välillä 0,0412–0,0589 €/kWh. Tämä tarkoittaa, että purku- ja lataussähkön markkinahintojen erotuksen tulisi olla tätä korkeampi, jotta kaupankäynti olisi voitollista. Kuvasta 2 voidaan havaita hintojen erotuksen pysyneen pääosin tätä kiinteää vähennystä suurempana, mikä selittää suhteellisen korkeaa euromääräistä voittoa. Tuloksesta voidaan päätellä, että voittoa tavoittelevan sähkökaupan käyminen on kannattavaa, kun sähkön hinnan päivänsisäiset vaihtelut ovat riittävän suuria kumoamaan kiinteiden ostohintaan lisättävien maksujen vaikutuksen.

Testiviikolla 2 sähkön hinnat olivat poikkeuksellisen korkealla. Viikon aikana kertynyt sähkökaupan tulos oli tässäkin tapauksessa voitollinen ollen 115,54 €, vaikkakaan ei aivan yhtä korkea kuin tapauksessa 1. Kuvasta 3 nähdään, että myös tässä tapauksessa sähkön purkuhinta oli läpi viikon korkeammalla kuin lataushinta. Testiviikon halvimman ostetun ja kalleimman myydyn tunnin erotus oli 0,4250 €/kWh, mikä on euromääräisesti verrattain suuri. Myös kuvasta 3 nähdään, että hintojen erotus on pääsääntöisesti pysynyt aikasiirtosopimuksen kiinteiden vähennysten yläpuolella, jolloin toiminta on voitol-

lista. Poikkeuksellisen korkeilla sähkön markkinahinnoilla ei kuitenkaan ollut erityistä vaikutusta sähkökaupan kannalta, vaan merkityksellisempää on, kuinka suuria hinnan vaihtelut ovat päivän aikana suhteutettuna sähkön ostohintaan lisättäviin maksuihin.

Testiviikolla 3 sähkön hinnat olivat myös poikkeukselliset, sillä ajoittain tuntihinta oli jopa negatiivinen ja pääosin hyvin lähellä nollaa. Sähkö oli siis markkinahintansa puolesta välillä ilmaista. Sähkön markkinahintaan lisätään kuitenkin vielä siirtomaksu ja sähkövero, jolloin kokonaishinta ei jäänyt koskaan negatiiviseksi. Viikon aikana sähkökaupalla olisi syntynyt tappiota -188,01 €, mikä on testitapauksista alhaisin tuotoltaan. Kuvasta 4 nähdään, että myyntihinnat pysyivät lähellä nollaa erityisesti alkuviikosta ja suurempia eroja hintojen välillä oli havaittavissa vasta loppuviikon aikana. Ero halvimman ostetun ja kalleimman myydyt tunnin välillä viikolla oli 0,0186 €/kWh. Tappio viikon lopullisessa tuloksessa selittyy sähkön ostohintaan lisättävillä kiinteillä maksuilla, jotka sähkön markkinahinnan ollessa vain sentin osia, kasvattavat todellisen ostohinnan moninkertaiseksi. Tuloksista voidaan päätellä, että sähkökaupan käyminen ei ole kannattavaa, kun sähkön hinta on selvästi alhaisempi kuin sen siirtämisestä koituvat maksut ja verot kilowattituntia kohden.

Neljännellä testiviikolla sähkön hinnat eivät olleet poikkeuksellisia, vaan suhteellisen tavanomaisia kesäkaudella. Ero halvimman ostetun ja kalleimman myydyt tunnin välillä viikolla oli 0,0800 €/kWh. Tapaus olikin tutkinnan arvoinen juuri tavallisuutensa vuoksi. Viikkotuotto jäi testiviikolla kuitenkin negatiiviseksi ollen -164,24 €. Sähkön hintakehitys oli viikolla maltillista, mikä voidaan havaita myös kuvasta 5. Kuvassa lataus- ja purkuhintojen graafit pysyttelevät lähellä toisiaan ja vasta loppuviikosta alkavat poiketa toisistaan. Ero osto- ja myyntihintojen välillä ei siis riitä kumoamaan kiinteitä sähkön siirtomaksusta ja sähköverosta aiheutuvia vähennyksiä. Tästä voidaan päätellä, että sähkön hintojen ollessa tavanomaisia ja päivänsisäisen hintakehityksen ollessa vakaata, ei ole kannattavaa käydä voittoa tavoittelevaa sähkökauppaa.

Taulukko 2. Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

Testiviikko	1 (21/2022)	2 (50/2022)	3 (21/2023)	4 (28/2023)
kWh hintojen keskiarvo	0,1589 €/kWh	0,4109 €/kWh	0,0082 €/kWh	0,0508 €/kWh
kWh hintojen suurin ero	0,2278 €/kWh	0,4250 €/kWh	0,0186 €/kWh	0,0800 €/kWh
Tulos	222,58 €	115,54 €	-188,01 €	-164,24 €
Päätelmät	Päivänsisäiset vaihtelut sähkön hinnassa ovat suuria, jolloin myös sähkökaupan kannattavuus kasvaa.	Poikkeuksellisen korkeilla sähkön markkinahinnoilla ei ole erityistä vaikutusta, vaan merkityksellisempää on, kuinka suuria päivänsisäiset hinnan vaihtelut ovat.	sähkökaupan käyminen ei ole kannattavaa, kun sähkön hinta on selvästi alhaisempi kuin sen siirtämisestä koituvat maksut ja verot kilowattituntia kohden.	Ero osto- ja myyntihintojen välillä ei riitä kumoamaan kiinteitä sähkön siirtomaksusta ja sähköverosta aiheutuvia vähennyksiä. Sähkökauppa ei ole kannattavaa tavanomaisilla sähkön hinnoilla päivänsisäisten hintojen ollessa vakaita.

6.2 Tulosten luotettavuus ja yleistettävyys

Tulosten luotettavuutta voidaan pohtia esimerkiksi lähtöarvojen kannalta. Lähtöarvoista akun kapasiteetti ja latausteho ovat nimellisarvoja, ja niissä saattaa esiintyä pieniä poikkeavuuksia. Tutkimuksessa käytetty latausteho 6,6 kW on hyvin yleinen kotilatausasemalle ja juuri sen yleisyyden vuoksi valittu myös tähän tutkimukseen. Lataustehon muuttaminen esimerkiksi tasavirtalatausta käytettäessä vaikuttaisi tuloksiin merkittävästi. Tulokset eivät näin ollen ole yleistettävissä eri tehoisille latausasemille. Myös sähköautojen akkujen kapasiteetit poikkeavat toisistaan huomattavasti. Esimerkiksi tavallisessa Nissan Leaf e -mallissa akun kapasiteetti on vain 39 kWh, joten se ei soveltuisi tähän tutkimukseen, missä sähkökauppaan varattu akkukapasiteetti on määritetty olevan 40 kWh. Kuitenkin tätä isomman akkukapasiteetin omaavat autot ovat vertailukelpoisia tutkimuksen kannalta.

Tutkimuksessa hyötysuhteeksi määritettiin 90 %, mikä on myös hyvin yleinen hyötysuhde sähköautojen latauksessa. Hyötysuhde saattaa kuitenkin vaihdella merkittävästi

ympäristön lämpötilan mukaan, kuten Trentaduen et al. tekemässä tutkimuksessa osoitettiin. Siksi 90 % hyötysuhde ei välttämättä anna täysin oikeaa kuvaa kaikissa tutkimuksessa käytettyjen ajanjaksojen olosuhteissa, joista osa ajoittui talvelle ja osa kesälle, vaan saattaa aiheuttaa virhettä tulosten totuudenmukaisuuteen.

Tutkimuksessa käytettiin sähkön siirtämiseen aikasiirtosopimusta, joka määrittää tietyt sähköhinnat. Samat siirtohinnat eivät ole samaistettavissa muihin sopimustyyppisiin. Kuitenkin sähkön siirtohintaan lisättävä sähkövero on Suomessa sama sopimustyyppistä riippumatta, joten sen osalta tulos on yleistettävissä.

Vertailukohdetta taloudelliselle hyödyille voidaan hakea Alec N. Brooks'n tutkielmasta, jossa vuositason skaalattuna rahallinen hyöty oli [4 615–7 653] €. Kun tämän työn tulokset skaalataan vuositason, vaihtelee rahallinen hyöty välillä [-9777–11 574] €. Huomionarvoista on, että tässä tutkielmassa oli mukana myös tappiollisia viikkoja, joiden vuoksi vaihtelu väli on laaja. Mikäli huomioidaan vain viikot, joilla tulos oli positiivinen, niin vaihteluväli on [6 008–11 574] €. Vaikka Brooks'n vuonna 2002 saamat tulokset ovat inflaatiokorjattuja, ovat ne noin 23–33 % pienempiä kuin tämän työn tulokset viikoilta, joilla tulos oli voitollinen. Tätä voidaan selittää yli 20 vuoden aikana tapahtuneella teknologisella kehityksellä, joka on mahdollistanut esimerkiksi suuremmat akkukapasiteetit sähköautoissa, mutta myös yleisellä sähköhintojen vaihtelulla. Tuloksiin sisältyy myös maakohtaisia eroja, sillä Brooks'n selvitys oli toteutettu Yhdysvalloissa, ja tämä tutkimus käsittelee tilannetta Suomen oloissa.

Ensisijaisesti tutkimustuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, mutta tarkka euromääräinen tulos ei välttämättä ole kovin luotettava. Tulokset ovat kuitenkin osittain yleistettävissä muihin samantyyppisten tutkimusten tuloksiin. Tehoiltaan ja kapasiteeteiltaan erilaisten latausasemien ja akkujen sisällyttäminen simulointialgoritmiin vaatii jatkokehitystä. Algoritmin tuottamaan vastaukseen voisi myös sisällyttää tietyt tunnit, jolloin sähköä tulisi ostaa ja myydä, jotta tuloksen saavuttaminen onnistuu. Myös hyötysuhteen vuodenaikariippuvuuden tarkastelu ja tarkempi tapauskohtainen määrittely voi antaa aihetta lisätutkimukselle.

7. YHTEENVETO

Ladattavien sähköautojen yleistyminen Suomessa ja latausteknologian kehittyminen on luonut puitteita sähköautojen hyödyntämiseen energian varastoinnissa. Työssä selvitettiin sähköautojen käyttöä energiavarastoina erityisesti taloudellisessa mielessä yksittäisen sähköauton omistajan kannalta.

Taloudellista hyötyä selvitettäessä määritettiin käyttäjäprofiili käyttötapausta varten. Profiiliin sisältyi kaksisuuntaista latausta tukeva sähköauto Nissan Leaf e+, jonka 59 kWh akkukapasiteetti jaettiin lohkoiksi siten, että käyttäjän päivittäistä työmatka-ajamista varten akusta varattiin 19 kWh lohko ja jäljelle jäävää 40 kWh lohkoa käytettiin sähköä edestakaiseen siirtoon taloudellisen hyödyn tavoittelussa. Akun tekniseen toteutukseen ei otettu tässä työssä kantaa. Käyttötapausta varten valittiin myös sopiva sähkönsiirtosopimus. Sopimustyypeistä edullisimmaksi osoittautui aikasiirtosopimus, jolla sähkönsiirto on yöaikaan halvempaa kuin päivällä. Käyttötapauksessa sähköauto on kytkettynä verkkoon pääosin yöllä, joten sopimus oli tarkoitukseen parhaiten soveltuva.

Tarkasteluajaväliksi asetettiin yksi työviikko arkipäivien osalta eli maanantaista perjantaihin. Tänä aikana sähköauto oli kytkettynä verkkoon 15 tuntia päivässä, joista 12 tunnin ajan suoritettiin sähkökauppaa siirtämällä sähköä edestakaisin auton ja sähköverkon välillä. Vertailuun otettiin markkinahinnoiltaan erityyppisiä viikkoja, jolloin sähkökauppaa harjoitettiin. Neljän testiviikon piirteitä olivat vaihtelevat, korkeat, matalat, ja tavanomaiset sähköhinnat vastaavassa järjestyksessä. Lopputulokseksi saatiin, että sähkönsiirtohinnan ja päivänsisäisen markkinahinnan erotuksen välisellä suhteella on suurin merkitys sähkökaupan kannattavuuteen. Mikäli sähköhintojen vaihtelu jäi niin matalaksi, ettei oikea-aikaisella ostolla ja myynnillä pystytty kattamaan sähkönsiirrosta aiheutuneita kustannuksia, oli tulos tappiollinen. Kahdella testiviikoista toiminta olisi ollut kannattavaa, mutta kahdella tulos oli negatiivinen, eikä kaupankäynti olisi siis ollut kannattavaa.

Tutkimuskysymyksiin sähköauton käytöstä energiavarastona taloudellisen hyödyn tavoittelussa onnistuttiin vastaamaan suuntaa antavilla tuloksilla varsin erilaisia sähkönhintoja sisältäneen tarkastelun jälkeen. Tulosten luotettavuutta ja yleistettävyyttä pohditettiin erilaisista perspektiiveistä ja tuloksia pystyttiin tietyissä määrin vertaamaan muihin kirjallisuuslähteisiin. Tuloksia analysoimalla havaittiin myös mahdollisia kehitysideoita hyötysuhteen vuodenaikasadonnaisuuden huomioon ottamiseen, erilaisten sähköautojen ja latausasemien tuen lisäämiseen sekä algoritmin vastausten laajentamiseen sisältämään myös kyseiset tunnit, joina autoa tulisi ladata esitetyn tuloksen saavuttamiseksi.

LÄHTEET

Research project – Bidirectional charging (2021). Audi AG [viitattu 6.3.2023]. Saatavissa: <https://www.audi-technology-portal.de/en/download?file=2620>

Liikennekäytössä olevien ladattavien henkilöautojen määrä (2023). Autoalan Tiedotuskeskus [viitattu 13.3.2023]. Saatavissa: <https://www.aut.fi/tilastot/autokannan-kehitys/sahkoautojen-maaran-kehitys>

Sami Anteroinen (2020). ”Tutkimus- ja kehitystyö tähyää tulevaisuuteen”. Fingrid [viitattu 29.4.2023]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/tutkimus-ja-kehitystyö-tahyää-tulevaisuuteen/>

Brooks, A. N. (2002). Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division [viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: https://heritageproject.caltech.edu/documents/21133/Carb_V2G_project_final_report_emIP1Xu.pdf

Protocol Development (2023). CHAdeMO [viitattu 11.5.2023]. Saatavissa: <https://www.chademo.com/technology/protocol-development>

Hinnan määräytyminen sähköpörssissä (2016). Energiateollisuus [viitattu 6.3.2023]. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20160502183128/http://energia.fi/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat/hinnan-maaraytyminen-sahkoporssissa>

”Electric car battery capacity & lifespan” (2023). E.ON Energy [viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: <https://www.eonenergy.com/electric-vehicle-charging/costs-and-benefits/battery-capacity-and-lifespan.html>

BYD Han (2023). EV Database [viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://ev-database.org/car/1784/BYD-HAN>

Sähkön tuotanto ja kulutus (2023). Fingrid [viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Nissan LEAF ja LEAF e+ – Hinnasto ja tekniset tiedot (2023). Nissan Nordic Europe Oy [viitattu 31.7.2023]. Saatavissa: https://www.nissan.fi/content/dam/Nissan/fi/brochures/pricelist/Hinnasto_ja_tekniset_tiedot_MY21.pdf

Matti-Pekka Nuorva (2019). ”Sähköauto dynaamisena energiavarastona sähkömarkkinoilla”. Tampereen yliopisto [viitattu 2.5.2023]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201905311797>

Maria Nykänen (2022). ”Euroopan sähkömarkkinat ovat nyt täydessä kriisissä – tästä se johtuu”. MTV Uutiset [viitattu 6.3.2023]. Saatavissa: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/sahkomarkkinat-ovat-nyt-taydessa-krisissa-tasta-se-johtuu/8502996>

Antti Rautiainen (2015). ”Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids”. Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 19.4.2023]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3615-1>

Jason Svarc (2023). " Bidirectional Chargers Explained - V2G Vs V2H Vs V2L". Clean Energy Reviews [viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-charging-v2g-v2h-v2l>

Verkkopalveluhinnasto 1.7.2023 alkaen -sulakepohjaiset tuotteet (2023). Tampereen Sähköverkko Oy [viitattu 31.7.2023]. Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/hinnastot-ja-sopimusehdot/2023-07-01---verkkopalveluhinnasto---sulakepohjaiset-tuotteet.pdf>

Danny Thai (2022). " Which Electric Cars Have Bidirectional Charging (V2L, V2G, V2H)?" [viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://zecar.com/resources/which-electric-cars-have-bidirectional-charging#BYD%20Atto%20-%20V2L>

"Henkilöautoja liikenteessä 2,74 miljoonaa - sähköautojen määrä miltei kaksinkertaistui" (2023). Liikenne- ja viestintävirasto Traficom [viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/henkiloautoja-liikenteessa-274-miljoonaa-sahko-autojen-maara-miltei-kaksinkertaistui>

Trentadue, G., Rocha Pinto Lucas, A., Otura Garcia, M., Pliakostathis, K., Zanni, M. and Scholz, H., Evaluation of fast charging efficiency under extreme temperatures, ENERGIES, ISSN 1996-1073, 11 (8), 2018, p. 1937, JRC111628 [viitattu 31.8.2023]. Saatavissa: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111628>

Joonas Turunen (2022). " Ennuste: Ladattavien autojen määrä kasvaa Suomessa paljon aikaisempia arvioita nopeammin". Helsingin Sanomat [viitattu 18.3.2023]. Saatavissa: <https://www.hs.fi/talous/art-2000008621023.html>

Daren Wang (2022). " The Weekly Sun: Get ready to plug your house into your car" [viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://www.adtsolar.com/news/bidirectional-charging-the-next-big-thing/>

Marcus Ziemann (2018). "Huijataanko ihmisiä numeroilla? Väitetään, että autoa ei kannata omistaa, koska se seisoo 95 prosenttia ajasta". Yle Uutiset [viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-10169051>
(takaisinkytkentöjen rajausta simulaatiossa)

LIITE: MATLAB ALGORITMI

```

% Usage:
% Change "price_data" parameter to some predefined electricity price matrix

% Define the input parameters
battery_capacity = 40; % kWh reserved battery capacity for electricity trade
charging_power = 6.6; % kW
charging_efficiency = 0.90; % Efficiency rate
grid_time = 15; % Total time that EV is connected to grid in a day
time_off = 3; % Time that it takes to charge the EV's battery enough for the day's drivings
days_per_week = 5; % In this review period only weekdays are included
electricity_tax = 2.79372; % Finnish electricity tax which is added to transfer price (cnt/kWh)
electricity_price_night = 1.3268; % Price per kWh at night time in time transfer agreement (cnt/kWh)
electricity_price_day = 3.1; % Price per kWh at day time in time transfer agreement (cnt/kWh)

hours_per_day = grid_time - time_off; % Grid connection time reserved only for electricity trade

% Define the electricity price data matrixes for test cases
% Electricity prices at week 21/2023, 28/2023 & 50/2022 for working day hours 00-07 and 16-00
% Prices are (€/MWh)

week21_22 = [104.18    30.00 110.78    120.00    153.78
             98.54    23.86 80.07 107.77    151.41
             nan      nan      nan      nan      nan      nan
             nan      nan    30.20    nan    126.74
             97.80    22.21    nan    107.40    nan
             101.58   22.55 156.07    118.37   172.54
             210.85   108.91   163.41   188.91   202.70
             199.93   130.09   225.09   170.07   175.25
             217.25   198.23   158.68   194.95   199.06
             219.00   218.66   169.94   209.21   234.49
             186.93   211.83   159.83   243.43   249.99
             165.75   170.99   159.03   214.71   225.06
             180.00   165.42   155.47   215.01   190.00
             133.86   166.80   143.86   182.14   180.03

```

```

100.09    126.95    36.22 99.80 147.35]; % Moderately volatile
electricity prices from week 21/2022

```

```

%(max(week21_22, [], 'all')-min(week21_22, [], 'all'))*10^-3

```

```

week50_22 = [296.30    300.00    271.89    275.01    280.18
288.12    290.74         nan    260.53    242.41
280.19    279.46         nan         nan         nan
270.33         nan    278.00         nan    240.00
282.55         nan    299.99    272.15    240.00
296.35    289.87    311.21    306.91    276.90
347.59    338.54    368.82    300.00    382.82
478.55    485.03    545.00    590.00    450.00
449.82    500.00    590.00    665.01    531.15
429.10    499.91    557.00    595.94    476.36
467.80    485.53    520.57    522.58    395.09
305.31    439.90    487.90    452.47    320.01
299.91    367.72    396.67    353.79    325.00
         nan    336.95    351.72    321.03    252.63
         nan    305.39    328.94    283.08         nan]; % Relatively
high winter electricity prices from week 50/2022

```

```

%(max(week50_22, [], 'all')-min(week50_22, [], 'all'))*10^-3

```

```

week21_23 = [0.01    -3.07 2.43 2.84    nan
-0.04         nan 0.88 2.30 3.97
         nan    -3.29 0.00    nan 4.10
         nan         nan -0.03    nan 4.01
-0.02    -3.29 0.01 2.40 4.39
1.36 -2.10 1.30 3.91 6.23
2.15 -0.05 2.25 8.47 13.35
1.38 -2.06 -1.91 12.28 15.31
1.78 -1.09    nan 12.50 14.03
2.43 -0.15 -0.04 13.02 13.91
3.21 0.11 -0.02 10.38 13.00
3.44 1.43 -0.01 6.79 8.97
3.97 1.85 0.00 4.95 6.52
3.45 1.34 -0.12 4.12 4.64
2.21 -0.05    nan 2.64    nan]; % Interesting negative elec-
tricity prices from week 21/2023

```

```

%(max(week21_23, [], 'all')-min(week21_23, [], 'all'))*10^-3

```

```

week28_23 = [37.75    41.13 32.37 50.77 56.00
37.00    40.56 26.52 49.56 55.64
         nan         nan    nan 48.80    nan

```



```

    electricity_price_day    electricity_price_day    electric-
ity_price_day    electricity_price_day    electricity_price_day
    electricity_price_day    electricity_price_day    electric-
ity_price_day    electricity_price_day    electricity_price_day
    electricity_price_day    electricity_price_day    electric-
ity_price_day    electricity_price_day    electricity_price_day
    electricity_price_day    electricity_price_day    electric-
ity_price_day    electricity_price_day    electricity_price_day
    electricity_price_night electricity_price_night electric-
ity_price_night electricity_price_night electricity_price_night
    electricity_price_night electricity_price_night electric-
ity_price_night electricity_price_night electricity_price_night]; %
Prices for transferring electricity with time transfer agreement

transfer_prices = (transfer_prices_cnt + electricity_tax).*10^-2; %
(€/kWh)

price_data = sort(price_data + transfer_prices); % Total hourly electric-
ity prices sorted from low to high

% Calculate the total profit for the week

price_buy = 0; % Formatting param.
price_sell = 0; % Formatting param.

charge_time = 1:floor(hours_per_day/2); % Charging for half amount of
grid connection time reserved for electricity trade

discharge_time = floor(hours_per_day/2+1):hours_per_day; % Discharging
for rest of the available grid connection time reserved for electricity
trade

battery_state = 0; % Formatting param.

sell_time = 0; % Formatting param.

for n=1:days_per_week % Outer loop for every working day of the week

    for i=charge_time % Inner loop for every hour EV is used for buying
electricity from the grid for trading purposes

```

```

        while battery_state < (battery_capacity - charging_power * charging_efficiency) % Check when battery is fully charged and can't be charged anymore

            price_buy = price_buy + price_data(i,n);%,[],'omitnan' % kWh price sum calculated using lowest available day-ahead-prices

            %price_data(i,n)

            battery_state = battery_state + charging_power * charging_efficiency; % Amount of battery charged in one hour is added

        end
    end

    for i=discharge_time % Inner loop for every hour EV is used for selling electricity back to the grid

        while battery_state > (charging_power * charging_efficiency) % Check when battery is empty and can't be discharged anymore

            price_sell = price_sell + max(sell_data(i,n),[],'omitnan'); % kWh price sum calculated using highest available day-ahead-prices

            %sell_data(i,n)

            battery_state = battery_state - charging_power * charging_efficiency; % Amount of battery discharged in one hour is added

            sell_time = sell_time + 1; % Hours when electricity is sold along the week is added to later calculate the final profit

        end
    end
end

cost = sum(price_buy); %€/kWh

sales = sum(price_sell); %€/kWh

profit = (sales - cost) * sell_time * charging_power * charging_efficiency^2; % Weekly profit of the electricity trade.

```

```
% Display the result  
fprintf('The total profit for the week is %.2f€\n', profit);
```