



**Sähköauton latauksen kustannustehokas optimointi pienaurinkovoimalan
omaavassa omakotitalossa**

**Cost-effective optimization for an electric vehicle charging in a prosumer
household**

Juuso Liikkanen & Sara Moilanen

Bachelor's thesis

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

1. kesäkuuta 2023

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Juuso Liikkanen & Sara Moilanen

Sähköauton latauksen kustannustehokas optimointi pienaurinkovoimalan omaavassa omakotitalossa

2023

Kandidaatintyö

28 s.

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Antti Kosonen, Tutkijaopettaja Vesa Ruuskanen

Avainsanat: sähköauto; aurinkosähkö; kustannusoptimointi; älykäs lataus;

Sähköajoneuvojen käyttökulut muodostuvat pääasiassa sähköajoneuvon akun lataamiseen käytetystä sähköstä ja kuluvien osien vaihdosta. Tämän työn tavoitteena on optimoida sähköauton akun lataus mahdollisimman kustannustehokkaaksi omakotitalossa, jossa on pienaurinkovoimala. Optimointi, joka perustuu keskivertaisen suomalaisen ajoneuvon käyttötietoihin, on toteutettu ongelmapohjaisella algoritmilla. Mahdollisimman monen vertailukohdan saavuttamiseksi latauskustannukset laskettiin myös ilman älykästä latausta. Alhaisimmat latauskustannukset saatiin optimoinnille, jossa ei huomioitu käyttäjän käyttäytymistä, vaan sähköauto oli valmiina lataukseen koko ajan. Algoritmi käyttää täydellistä aurinkosähkön ennustetta ja hyödyntää ylijäämä aurinkosähköä sähköauton latauksessa, muutoin lataukseen käytetään verkkovirtaa. Nord Poolin pörssisähkön hintaa hyödynnetään halvimpien lataustuntien löytämiseen.

Työssä analysoitiin dataa vuosilta 2017–2022 ja vuosittaiset säästöt keskimääräisellä käyttäjäprofiililla olivat 24,7–51,6 %. Optimalisemmalla latauksella vuosittaiset säästöt olivat 37,4–54 %. Työn tulokset osoittivat, että mitä enemmän sähköautoa ladattiin päivittäin, sitä suuremmaksi rahalliset säästöt kasvoivat verrattuna optimoimattomaan lataukseen. Tulokset osoittivat myös sen, että sähkön hinnan vaihtelun takia joskus on kannattavampaa myydä tuotettu aurinkosähkö sähköverkkoon ja ladata sähköauto verkkosähköllä yöllä kuin ladata aurinkosähköllä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Juuso Liikkanen & Sara Moilanen

Cost-effective optimization for an electric vehicle charging in a prosumer household

2023

Bachelor's Thesis.

28 p.

Examiners: Associate professor Antti Kosonen, Associate professor Vesa Ruuska-

nen
Keywords: electric vehicle; solar energy; cost optimization; smart charging;

Electricity needed to charge the battery of electric cars, or EVs, and the repair of worn parts account for the majority of their running costs. This study intends to maximize the cost-effectiveness of EV battery charging for a home with a small-scale photovoltaic (PV) power plant. To closely reflect the behavior of the typical Finnish user, optimization is carried out utilizing problem-based optimization. To support the findings from this, optimization was also carried out to make EV charging as economical as feasible, taking into account the most likely user behavior. The lowest grid electricity prizes were found using data from the Nord Pool Spot market. Perfect PV power prediction was also used, and only leftover PV electricity was used for EV charging.

When comparing optimized charging versus uncontrolled charging over a five-year period, yearly savings with average user behavior were between 24.7—51.6 %. The yearly savings varied between 37.4—54.0 %, when the plausible user behavior was ignored and the EV was always able to be charged. This study's findings indicate that the cost-efficiency of the optimization increases with daily EV use when compared to unrestricted charging methods. The findings also demonstrate that, depending on daily swings in energy pricing, it may occasionally be more advantageous to sell produced PV electricity than to utilize it to charge an EV, choosing instead to charge the vehicle at night using grid electricity.

KIITOKSET

Tämä kandidaatintyö tehtiin artikkeli julkaisun "Cost-effective optimization for an electric vehicle charging in a prosumer household" pohjalta, joka on tämän työn julkaisemisajankohtana prosessissa lehteen.

Kiitokset kuuluvat myös LUT yliopiston uusiutuvan sähköenergian tuotanto- ja varastointi laboratorion työryhmälle, erityisesti Antti Kososelle, Vesa Ruuskaselle ja Jero Aholalle jotka uskoivat ja luottivat meille tehtäväksi lehteen asti menevän artikkelin kirjoittamisen, joka päättyi myös meidän kandidaatintyön aiheeksi.

Lappeenrannassa, huhtikuussa 2023

Juuso Liikkanen & Sara Moilanen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

kWh	kilowattitunti
PV	photovoltaic, aurinkosähkö
V2G	vehicle to grid, ajoneuvosta sähköverkkoon
PV2B	photovoltaic to battery, aurinkosähköä akkuun
G2B	grid to battery, verkkosähköä akkuun
PV2G	photovoltaic to grid, aurinkosähköä sähköverkkoon
E_{PV2B}	energy from PV to battery, energia virta aurinkopaneeleista akkuun
E_{PV2SC}	energy from PV to self-consumption, energia aurinkopaneeleista oma-
käyttöön	
p_{PV2E}	price to sell PV energy to the grid, hinta jolla aurinkoenergiaa myydään
E_{G2B}	energy from grid to battery, energia virta verkosta akkuun
E_{G2L}	energy from grid to base load, energia virta verkosta pohjakulutukseen
t	aika
p_{G2I}	price to import energy from the grid, hinta jolla energiaa ostetaan

Sisällys

1 Johdanto	1
1.1 Aiemmat tutkimukset	1
2 Lataamiseen liittyvät tekijät	4
2.1 Aurinkosähkön potentiaali Suomessa	5
2.2 Sähkön hinnoittelu Suomessa	7
3 Sähköauton lataamisen simulointi	9
3.1 Optimointialgoritmin rajoitteet	9
3.2 Optimoidut latausjärjestelmät	11
4 Tulokset	12
5 Yhteenveto	21
6 Johtopäätökset	24

1 Johdanto

Sähköajoneuvojen ja yksityisomistuksessa olevien pienimuotoisten aurinkosähköjärjestelmien määrä kasvaa nopeasti maailmanlaajuisesti, sekä Suomessa. (Statista 2022, Energiavirasto 2022b, IEA 2022, Tilastokeskus 2022) Suomessa rekisteröityjen sähköautojen määrä kasvoi 136 % vuodesta 2020 vuoteen 2021 ja hybridiajoneuvojen määrä kasvoi 69 % vuodesta 2020 vuoteen 2021. (Tilastokeskus 2022) Vuoden 2021 loppuun mennessä molempien edellä mainittujen määrä oli yhteensä 2,8 % kaikista Suomessa rekisteröidyistä ajoneuvoista. Sama nouseva trendi on nähtävissä myös pienimuotoisissa aurinkosähkölaitoksissa Suomessa. Energiaviraston mukaan tuotantokapasiteetti kasvoi vuonna 2021 yli 100 MW, yhteensä 395 MW:iin. (Energiavirasto 2022a) Tämän myötä aurinkosähkötuotanto on nyt 0,4 % Suomen kokonaisenergiantuotannosta. Tällä hetkellä ei ole tilastoja siitä, kuinka monella kotitaloudella on sekä sähköauto että aurinkosähköjärjestelmä, mutta kun molempien yksityisomistus lisääntyy, voidaan olettaa, että myös samanaikainen omistus lisääntyy.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on optimoida sähköauton lataus mahdollisimman kustannustehokkaaksi kotitaloudelle, mihin on asennettu pienaurinkovoimala. Optimointi tehdään simuloimalla MATLAB -ohjelmistolla (MathWorks 2022). Simuloinneilla pyritään löytämään edullisimmat mahdolliset latauskustannukset ja todennäköisimmät latauskustannukset keskivertokäyttäjälle sekä vertailemaan tuloksia referenssi latauskustannuksiin. Tässä tutkimuksessa analysoidaan myös simuloinneista saatuja sivutuloksia, kuten sitä, mitkä tunnit ovat edullisimmat sähköautojen lataamiselle ja miten aurinkosähkön omavaraisuus käyttäytyy eri latauksilla.

1.1 Aiemmat tutkimukset

Koska nykymaailmassa käytetään yhä enemmän sähköautoja, on myös tehty useita tutkimuksia sähköautojen lataamisen sivuvaikutusten selvittämiseksi. Suurin ongelma on ollut sähköverkon kuormituspiikit, kun sähköautoja ladataan samaan aikaan, yleensä iltapäivällä (García-Villalobos et al. 2014, Luthander et al. 2019, Wang et al.

2019, Lacey et al. 2017). Garcia-Villalobos ym. mukaan, tämä ongelma huomattiin jo vuonna 2014, kun ensimmäiset hybridi-autot alkoivat nousta markkinoille (García-Villalobos et al. 2014). Tutkimuksessa päädyttiin siihen, että "älykäs lataus" olisi tulevaisuuden tapa, mutta yhdeksän vuotta myöhemmin yhtään todellista älykäs-tä latausjärjestelmää ei ole vielä kaupallistettu kuluttajille. Luthander ym. ja Wang ym. tutkivat tarkemmin sähköauton latauksen vaikutuksia sähköverkkoon (Luthander et al. 2019, Wang et al. 2019). Luthander ym. havaitsivat, että aurinkosähkö-energian käyttöä oli supistettava, vaikka sähkönkulutus kasvoi kun täyssähköautoja ladattiin kahden viikon tutkimusjaksolla. Wang ym. tutkimuksessa keskityttiin lähinnä sähköverkon vakauteen ja todettiin, että sähköverkon kannalta on parempi ladata sähköautoja verkon kannalta hiljaisina aikoina, jolloin myös sähkön hinnat ovat alhaisemmat (Wang et al. 2019). Ma:n ja Mohammend:in tutkimuksessa tutkitaan useiden samanaikaisten sähköautojen latausasemien tuottamia hyötyjä ja haittoja (Ma & Mohammed 2014). Heidän tutkimuksessaan on suunniteltu asema jossa on aurinkosähkö-, V2G- (Vehicle to grid), V2H- (Vehicle to home) ja V2V- (Vehicle to vehicle) tekniikkaa käytetty, jotta voitaisiin minimoida sähköauton vaikutus verkkoon ja maksimoida latauksen aurinkosähkön käyttö. Datta ym. tekemässä tutkimuksessa keskitytään käyttämään sähköautoa energiavarastona ja lataamaan sitä halvimpaan sähköaikaan sekä myymään korkeimpaan hintaan. Näin ajoneuvon akkua hyödynnettiin aurinkosähkön energiavarastona (Datta et al. 2019).

Vain harvat nykyisillä markkinoilla olevat sähköajoneuvot tukevat ajoneuvon ja sähköverkon molemmiin suuntaiseen vuorovaikutuksen välistä tekniikkaa, minkä vuoksi V2G teknologiaa ei oteta mukaan tähän tutkimukseen. Samankaltaisia tutkimuksia ovat (Fachrizal & Munkhammar 2020) ja (Petrusic 2021), mutta suuri ero näissä tutkimuksissa on se, että niissä keskitytään siihen, että aurinkosähkön omavaraisuus ja omakäyttö on mahdollisimman suuri, eikä järjestelmän omistajalle koituvaa taloudellista hyötyä yritetty kasvattaa. Petrusic pystyi lataamaan sähköauton käyttämällä 86,7 % aurinkosähköä Serbiassa (Petrusic 2021). Fachrizal ja Munkhammar pystyivät lisäämään aurinkosähkön omakäyttöä 8,7 %, kun he lisäsivät sähköauton kotitalouteen, jossa oli olemassa oleva pienaurinkovoimala (Fachrizal & Munkhammar

2020). Liu ym. ja Gjelaj ym. tutkivat sähköauton latauksen optimointia ottaen samalla huomioon aurinkosähköjärjestelmien käyttäjän, joka on samankaltainen kuin tässä tutkimuksessa (Liu et al. 2021, Gjelaj et al. 2020). Molemmissa havaittiin, että kun V2G (Gjelaj et al. 2020) tai V2H (Liu et al. 2021) toteutettiin, latauskustannukset pienenevät. Molemmissa tutkimuksissa otettiin huomioon latauksen tehokkuus, kun taas vain (Gjelaj et al. 2020) tarkasteli myös akun kestävyyttä. Simonlinin ym. tutkimuksessa pyrittiin optimoimaan kahden sähköauton latausta huipputehoon perustuvien tariffien ratkaisemiseksi ja ottamaan samalla huomioon käyttäjien käyttäytymisen (Simolin et al. 2020). Heidän tutkimuksessa pystyttiin vähentämään huippukuormitusta ja samalla pienentämään latauskustannuksia jopa 59,8 %, mutta aurinkosähköjärjestelmää ei oltu toteutettu. Yoon ym. toteutti erilaisen lähestymistavan, jossa suurin optimoinnin hyötyjä on sähkön vähittäismyyjä. Tässä myyjä antaa tietyn määrän energiaa tarvitseville asiakkaille ja sitten vähittäismyyjä pystyy optimoimaan latausajan. Lacey ym. tutkimuksessa pyritään arvioimaan vaikutuksia sähköajoneuvojen akkujen keston, kun lataus suoritetaan verkon kannalta optimaalisimmalla tavalla ja otetaan samalla käyttöön V2G (Lacey et al. 2017). Tämä on tärkeää ottaa huomioon, jos tässä tutkimuksessa simuloitu kustannustehokkuuteen perustuva latausjärjestelmä toteutetaan.

Älykkäitä energiankäytön ohjausmenetelmiä on tutkittu aiemmin myös kotitalouskäyttöön käyttöveden lämmityksen optimoimiseksi (Knuutinen et al. 2021) ja aurinkosähkön omakäytön lisäämiseksi käyttäen kahta eri energiavarausta (Thygesen & Karlsson 2014). Samantyyppisiä ohjausmenetelmiä voidaan käyttää myös sähköautojen lataukseen, jos se katsotaan tarkoituksenmukaiseksi, ja jopa mahdollisesti koko kotitalouden energiankulutus on mahdollista optimoida.

Kuten mainittu, sähköauton latauksen optimointia on tutkittu useissa tutkimuksissa. Tämän tutkimuksen tavoitteena on simuloida sähköauton lataaminen mahdollisimman kustannustehokkaaksi suomalaisessa kotitaloudessa, johon on liitetty pienimuotoinen aurinkosähkölaitos.

2 Lataamiseen liittyvät tekijät

Suomessa vuonna 2019 henkilöautolla ajettiin keskimäärin noin 13 600 km (Statfin 2020). Simolinin ym. mukaan sähköauton keskimääräinen energiankulutus Suomessa on 0,25 kWh/km, mutta uudemmat mallit pärjäävät kuitenkin vähemmällä teholla ja vanhemmat mallit tarvitsevat huomattavasti enemmän (Simonlin 2022). Keskimääräiseen kulutukseen vaikuttavat esimerkiksi ajonopeus ja ulkolämpötila, mutta tässä tutkimuksessa käytetään keskiarvoa vakiona. Tämä kulutus huomioon ottaen sähköauton päivittäiseksi energiankulutukseksi valittiin 9 kWh, mikä vastaa 13 140 km ajettua vuotuista tai 36 km päivittäistä ajomatkaa. Vertailuna tuloksiin, jotka saatiin 9 kWh:n päivittäisestä energiantarpeesta, valittiin 18 kWh, jotta nähtäisiin, miten latauksen hinta muuttuisi suuremmalla lataustarpeella. Tällä 18 kWh:lla sähköauto pystyisi ajamaan 26 280 km vuodessa tai 72 km päivässä, keskimäärin. Sekä 9 kWh- että 18 kWh-tapauksessa ei otettu huomioon sähköauton akun lämmittämiseen tarvittavaa energiaa, joka on merkittävä erityisesti talviaikaan.

Sähköautojen lataus voidaan tehdä lukuisilla eri lataustehoilla. Pikalaturit voivat tuottaa yli 300 kW tehon, mutta tämä ei ole mahdollista suurimmalle osalle suomalaisista kotitalouksista, eikä todennäköisesti koskaan tule olemaankaan. Tämä tutkimus on tarkoitettu todellista kotitaloutta varten, joten lataukselle on oltava joitakin rajoituksia. Maksimilataustehoa rajoittaa kotitalouksien sulakkeet (3 x 16 A @ 230 V), jolloin teho voi olla hieman yli 11 kW. Tätä 11 kW käytetään tässä tutkimuksessa vakio maksimi tehona. Useimmissa kotitalouksissa on (3 x 25 A @ 230 V) koko talon pääsulake, mikä pätee myös tässä tutkimuksessa käytettyyn rakennukseen. Pääsulakkeen tehorajoitus koskee aurinkosähkövoimalasta verkkoon menevää tehoa ja verkosta kotitaloutetaan tulevaa tehoa erikseen, mikä tarkoittaa, että teknisesti ottaen tietyissä olosuhteissa voisi olla mahdollista, että sähköauton latausteho olisi jopa 34 kW, jolloin 17 kW tulisi verkosta ja toinen 17 kW aurinkosähköstä. Teoriasa tätäkin lataustehoa voitaisiin kasvattaa entisestään ulkoisilla akkujärjestelmistä tai muista energian varastointimenetelmillä saatavilla tehoilla.

Tässä työssä simuloinnissa käytetyt tiedot ovat todellisesta kotitaloudesta, joka sijaitsee Kaakkois-Suomessa. (Kosonen & Keskisaari 2020) Tässä talossa on aurinkosähköjärjestelmä, jonka huipputeho on 21,5 kWp. Nämä aurinkopaneelit ovat suunnattu etelään, itään ja länteen. Kuten aiemmin mainittiin, tämän tutkimuksen tarkoituksena on optimoida sähköauton latauskustannukset, eikä aurinkopaneelista saatavaa rahallista hyötyä. Kyseisessä kotitaloudessa on normaali pohjakulutus, mikä kattaa kaiken talouden energiankulutuksen. Taloudessa on myös käytössä älykkäitä sähkönohjausmenetelmiä kuten kuuman veden lämmityksen säätely. Aurinkosähköteho on ensisijaisesti käytetty pohjakulutukseen ja vain ylijäämäsähköä voidaan käyttää sähköauton lataukseen. Tämä priorisointi tehdään sen vuoksi, että peruskulutus on jo ajoitettu aurinkosähkön tehokkaimpaan aikaan, eikä sitä voida siirtää enempää, toisin kuin sähköauton latausta.

Valtioneuvoksen mukaan tavanomainen työaika Suomessa on kello 8—16 välillä (Valtioneuvos 2021). Näin ollen kello 8—16 aikaväli oletettiin ajanjaksoksi, jolloin sähköauto ei ole käytettävissä lataukseen yhden optimointimenetelmän osalta.

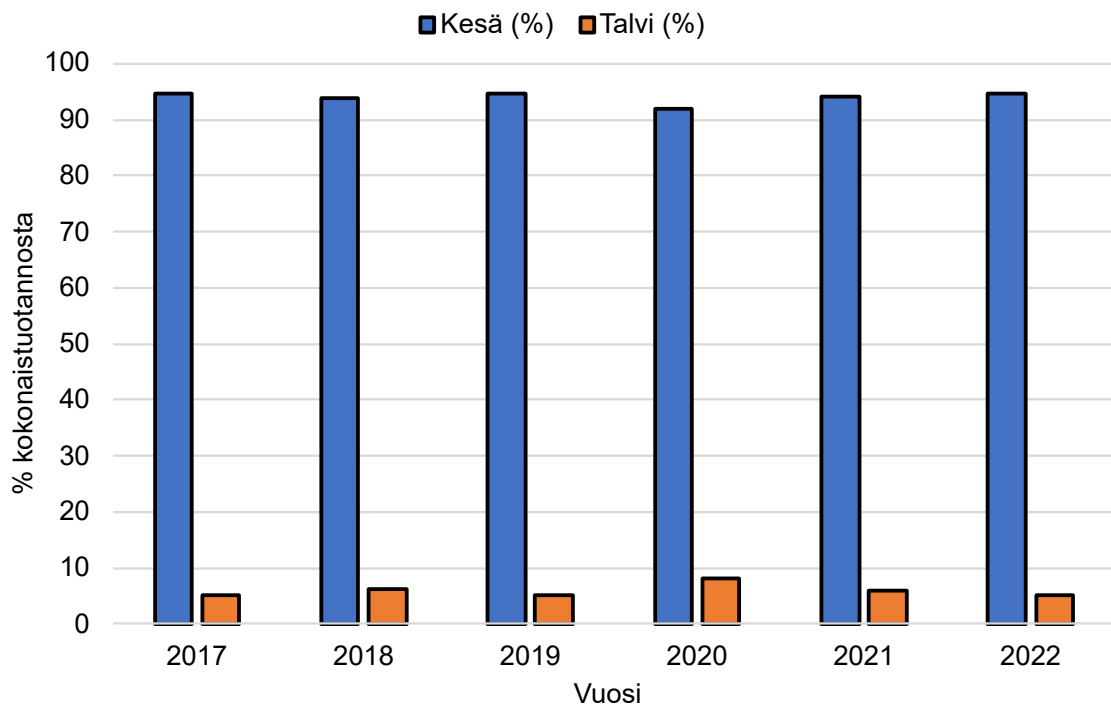
2.1 Aurinkosähkön potentiaali Suomessa

Knuutinen ym. huomauttivat, että Etelä-Suomessa on lähes sama vuotuinen aurinkosähköpotentiaali kuin Keski-Saksassa, ja suurin ero on vain kuukausittaisessa jakaumassa (Knuutinen et al. 2021). Kuten aiemmin mainittiin, asennettu aurinkosähkökapasiteetti Suomessa on ollut jatkuvassa kasvussa, koska kuluttajat ja yksityiset yritykset näkevät pienimuotoisissa aurinkosähköjärjestelmissä olevan rahallisen hyödyn potentiaalin.

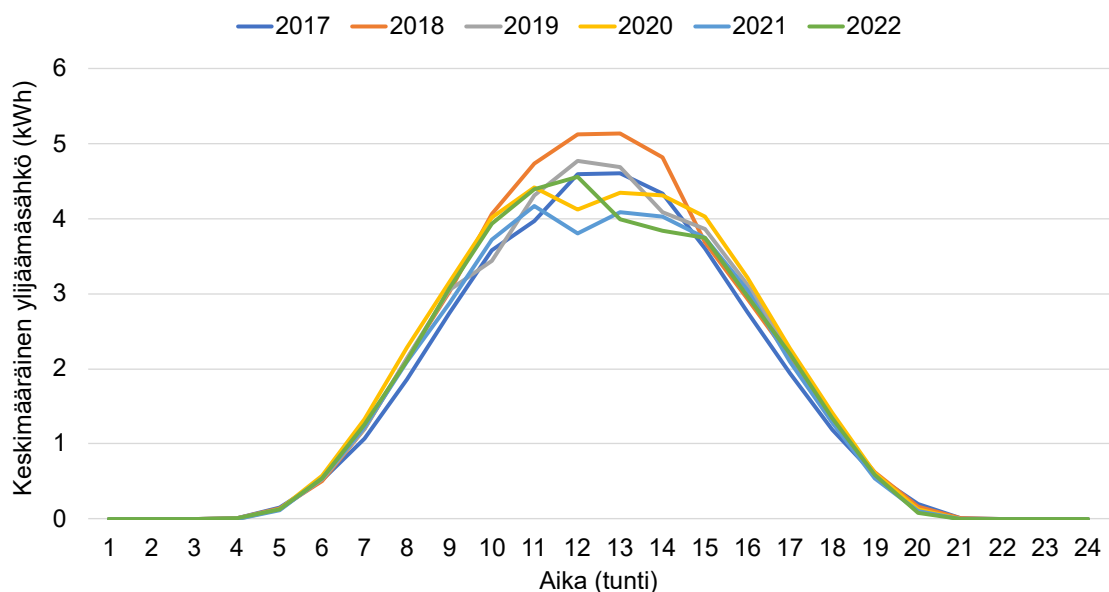
Tässä tutkimuksessa käytetyt aurinkosähkötehon tiedot mitattiin yhden tunnin tarkuudella vuosina 2017—2022. Suomessa aurinkosähköä tuotetaan enimmäkseen vain kesäkuukausina, jotka ovat aurinkoenergian näkökulmasta maaliskuusta syyskuuhun. Peruskulutustiedot ovat samalta ajanjaksolta. Peruskulutus oli keskimäärin

noin 20 kWh päivässä.

Kuvassa 1 esitetään auringoenergian tuotannon summa kesä- ja talvikuukausiin eroteltuna. Kuvassa 2 esitetään keskimääräinen ylijäämä sähkö yhden tunnin tarkkuudella. Kuvasta on huomattava, että aurinkosähkön tuotanto on talvikuukausina lähellä nollaa.



Kuva 1: Aurinkoenergian tuoton erottelu kesä- ja talviaikaan vuosina 2017—2022. Kesäaika aurinkoenergian tuotannossa on maaliskuusta syyskuun loppuun.



Kuva 2: Tuotettu ylijäämä aurinkosähkö.

2.2 Sähkön hinnoittelu Suomessa

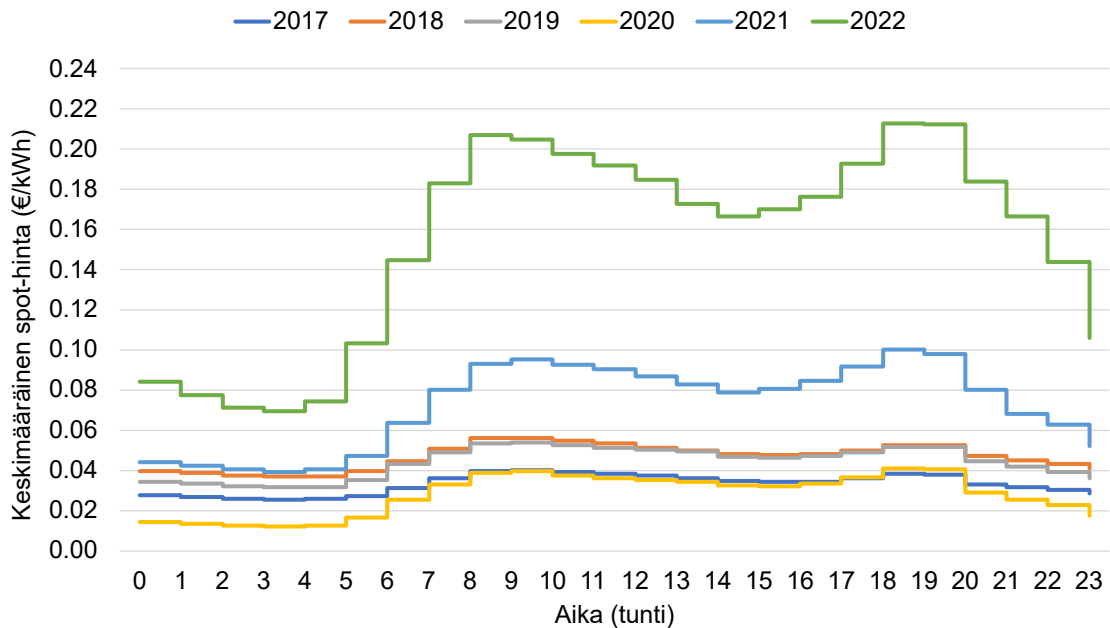
Suomessa sähkön tuntihinta muodostuu pörssihinnasta, joka muuttuu aina tunnin tarkkuudella. On myös muutama osatekijä, jotka voivat muuttua vuosittain ja henkilöittäin verkkoyhteyden ja sähkön osto- ja myyntisopimusten perusteella. Näitä elementtejä ovat sähkö- ja arvonlisävero, ostomarginaali ja siirto sekä myyntimarginaali ja siirto. Nämä elementit esitetään kunkin vuoden osalta taulukossa 1. Kuvassa 3 esitetään keskimääräinen pörssihinta tunneittain kultakin vuodelta.

Taulukko 1: Vuosittaiset sähkön hintaan vaikuttavat tekijät.

Vakio kustannukset	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Vero (€cent/kWh)	2,7937	2,7937	2,7937	2,7937	2,7937	2,7937
Marginaali (€cent/kWh)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Siirto (€cent/kWh)	2,78	3,063	3,64	3,64	4,15	4,15
Myynnin marginaali (€cent/kWh)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Myynnin siirto (€cent/kWh)	0,0868	0,0868	0,0868	0,0868	0,0868	0,0868

Tässä tutkimuksessa sähkön hinta kerättiin Nord Poolin tietokannasta Excel -tiedostona. Nord Pool (*Nord Pool 2022*) tarjoaa tarkat tuntikohtaiset sähkön hinnat Suomessa,

ja tämän ansiosta optimointi voitiin tehdä yhden tunnin tarkkuudella. Näitä Nord Poolilta kerättyjä pörssihintoja käytettiin ajoneuvon latauskustannusten määrittämiseen. Tuntikohtaisia hintoja käytettiin myös sen määrittämiseksi, olisiko kannattavampaa myydä kaikki ylimääräinen aurinkosähkö peruskulutuksen jälkeen verkkoon vai käyttää sitä ajoneuvon akun lataamiseen.

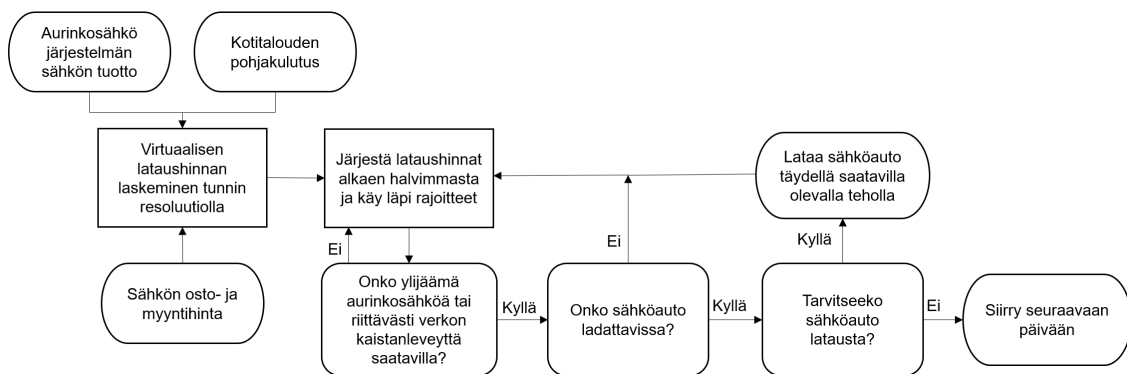


Kuva 3: Pörssihinta.

Kuva 3 osoittaa, että sähkön keskimääräinen tuntihinta on noussut merkittävästi vuonna 2022. Tämä johtuu Euroopan nykyisestä energiakriisistä. Tulevaisuudessa sähkön hintavaihteluita voidaan vähentää laajamittaisella kuluttajakäyttäytymisen muutoksella. Tämän tutkimuksen optimointi on yksi osa tätä tarvittavaa muutosta, jolla pyritään vähentämään sähkön hintapiikkejä.

3 Sähköauton lataamisen simulointi

Simulointi tehtiin MathWorks® -laskinohjelmistolla ja simulointityökalulla MATLAB. Vertailun vuoksi luotu referenssi optimointimenetelmä oli ohjelmoitu MATLABiin suoraan, mutta älykkäitä optimointeja varten tarvittiin optimointityökalu, joka on tehty lineaaristen, kvadraattisten, kartiomaisten, kokonaislukujen ja epälineaaristen optimointiongelmien ratkaisemiseen. Kuva 4 on lohkokaavio, joka kuvaa miten älykkäiden optimointimenetelmien algoritmi yksinkertaistettuna toimii.



Kuva 4: Optimointijärjestelmää kuvaava vuokaavio.

3.1 Optimointialgoritmin rajoitteet

Saadakseen sähköauton latauskustannukset vertailukelpoisiksi optimoinnin ulkopuolelle, täytyy lataukseen asettaa samat rajoitukset kuin oikeassakin järjestelmässä olisi. Kaava 1 kuvastaa yhtälöä, jota optimointialgoritmi pyrkii minimoimaan.

$$J = \sum_{t=1}^N [(E_{PV2B,t} + E_{PV2SC,t}) \cdot p_{PV2E,t} + (E_{G2B,t} + E_{G2L,t}) \cdot p_{G2,t}] \quad (1)$$

Kaavassa 1 N on kerrallaan tehtävän optimoinnin pituus, tässä tapauksessa yksi päivä eli $N = 24$. $E_{PV2B,t}$ on energiavirta aurinkopaneeleista akkuun ja $E_{PV2SC,t}$ energiavirta aurinkopaneeleista omakäyttöön tiettyä ajankohtana t . $p_{PV2E,t}$ on se rahallinen arvo, joka voitaisiin saada jos aurinkopaneelin tuottama energia myytäisiin. $E_{G2B,t}$ on energiavirta verkosta akkuun ja $E_{G2L,t}$ energiavirta verkosta kotitalouden

kuormaan tiettyä ajankohtana t . $p_{G2L,t}$ on verkosta ostetun sähkön hinta.

Ensimmäinen latauksen rajoite on, että energiavirta kotitalouden pohjakulutukseen ja auton akkuun ei voi olla suurempi kuin taloudessa olevan sulakkeen nimellisvirta. Tämä on ilmaistu optimoinnissa kaavalla 2.

$$E_{G2L,t} + E_{G2B,t} \leq E_{BW} \quad (2)$$

Toinen rajoite on, että silloin kun auto on paikalla, energiavirta joko aurinkopaneeleista tai verkosta on oltava riittävä lataamaan auton koko akku täyteen joka vuorokausi. Tätä kuvaa lauseke 3.

$$\sum_{t=1}^N (E_{PV2B,t} + E_{G2B,t}) = E_{Need} \quad (3)$$

Kolmas rajoite, joka on kuvattu lausekkeella 4, tarkoittaa, että ajoneuvoa ei voi ladata silloin kun se on asettu olemaan poissa.

$$\sum_{t=t_{off}}^{t_{on}} (E_{PV2B,t} + E_{G2B,t}) = 0 \quad (4)$$

Neljäs rajoite, jota kuvaa lauseke 5, tarkoittaa, että energiavirta aurinkopaneeleista summattu verkosta tulleen energiavirran kanssa ei voi ylittää laturin kaistanleveyttä.

$$\begin{aligned} 0 &\leq E_{PV2B,t} \\ 0 &\leq E_{G2B,t} \\ 0 &\leq E_{PV2B,t} + E_{G2B,t} \leq E_{Charger\ bandwidth,t} \end{aligned} \quad (5)$$

Viides ja viimeinen rajoite tarkoittaa, että lataukseen käytetty aurinkoenergia ei voi olla enempää kuin aurinkopaneeleiden tuottama ylijäämä energia. Tätä kuvaa lauseke 6.

$$E_{PV2B,t} \leq E_{PV,left,t} \quad (6)$$

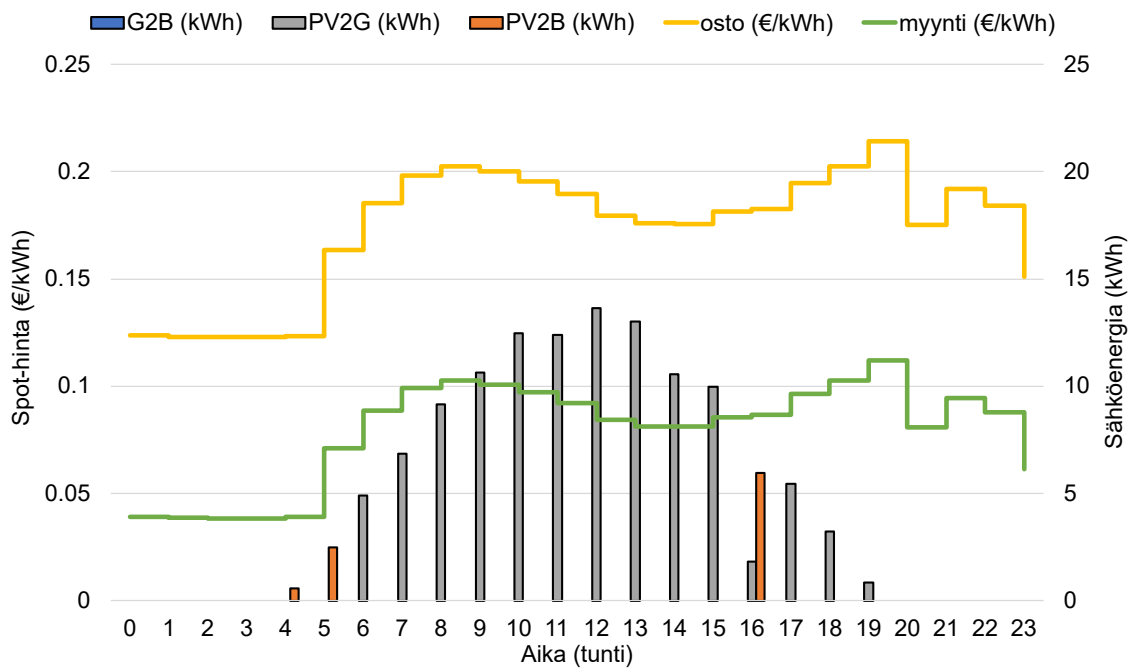
3.2 Optimoidut latausjärjestelmät

Tässä tutkimuksessa arvioidaan sähköautojen latauskustannuksia kahdella eri latausajankohdalla. Ensimmäinen on optimaalisin latausmenetelmä, jossa sähköauto on aina käytettävissä lataukseen. Tätä optimointia kutsutaan myöhemmin nimellä smart24, ja se antaa parhaan mahdollisen kustannusoptimaalisen latauksen, joka voidaan saavuttaa tutkitussa kotitaloudessa.

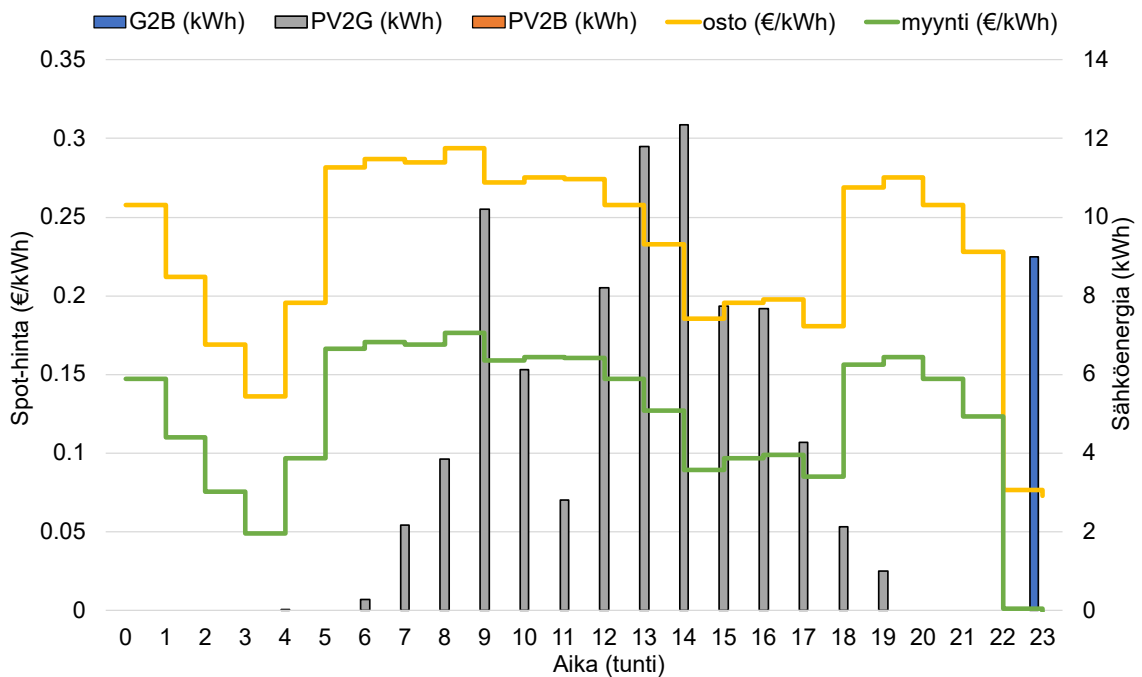
Toisella simuloinnilla pyrittiin simuloimaan sähköauton käyttäjän keskimääräistä käyttäytymistä. Tässä simulointimenetelmässä otetaan huomioon sähköauton käyttäjän keskimääräinen työaika. Tämä tarkoittaa, että auto ei ole käytettävissä lataukseen kello 8—16 välisenä aikana. Myöhemmin tutkimuksessa tätä menetelmää kutsutaan nimellä smart16.

4 Tulokset

Simulointitulokset osoittivat, että optimaalisin tapa ladata sähköauto vaihtelee, koska sähkön hinta ja aurinkosähkön määrä vaihtelee päivittäin. Kuvasta 5 nähdään simulaatiotulokset sähköauton optimaalisesta latauksesta heinäkuun viidenneltä päivältä vuonna 2021 ja samalta päivältä vuonna 2022. Tässä optimoinnissa sähköautoa ei voinut ladata kello 8 ja 16 välillä. Kuva 5 osoittaa miten lataus jakautui tunnin tarkkuudella, kuinka paljon aurinkosähköä myytiin verkkoon, sähkön tuntikohtaisen hinnan ja aurinkopaneelien tuottaman sähkön arvon.



(a)



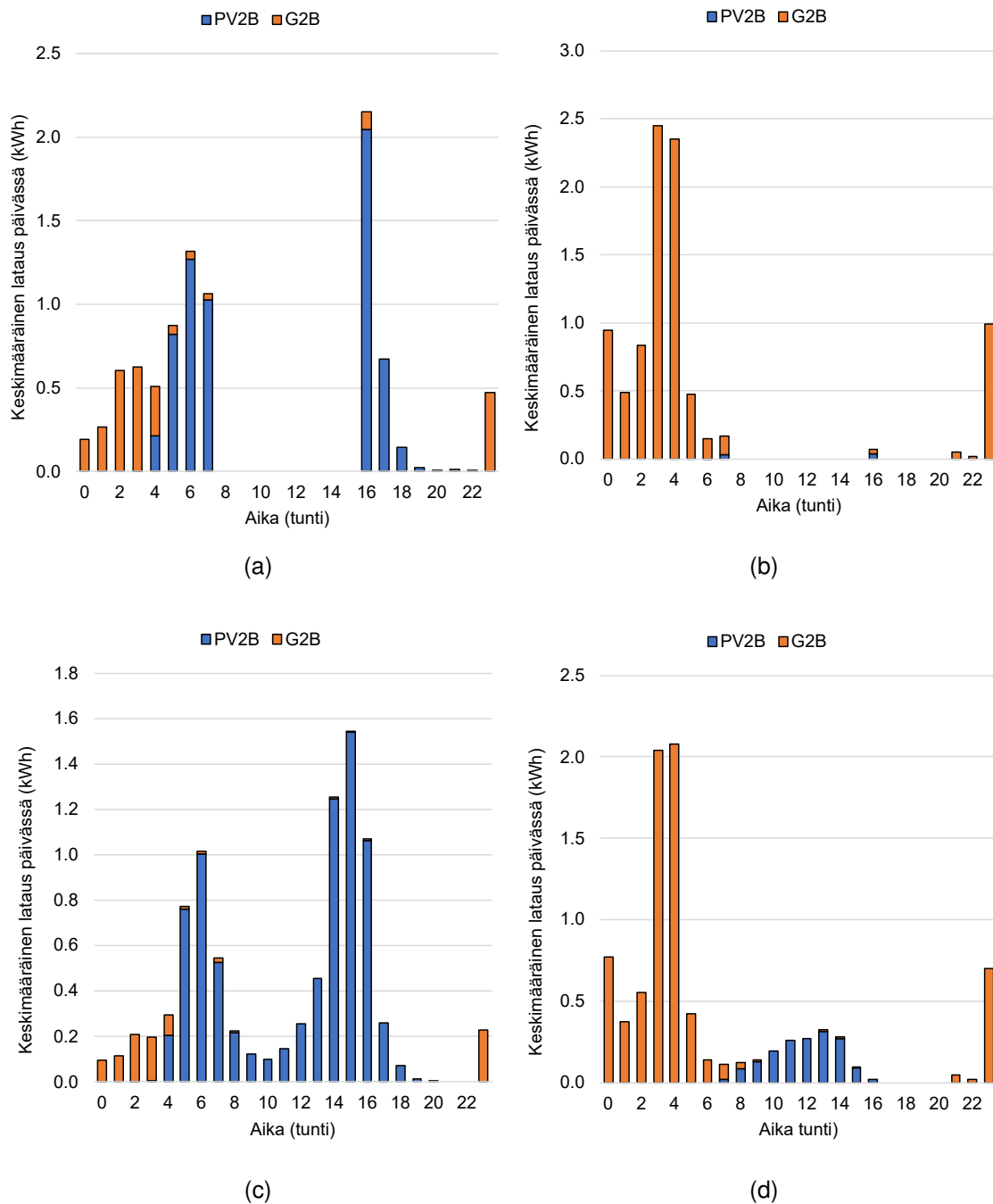
(b)

Kuva 5: Sähköauton optimaalinen lataus kahtena eri päivänä. a) 5.7.2021 b) 5.7.2022.

Sähkön hinnan muutos muuttaa kustannustehokkainta tapaa ladata sähköauto, kun

verrataan samaa päivää vuosilta 2021 ja 2022. Kuten kuvasta 5a nähdään, vuonna 2021 sähköautoa ladattiin vain aurinkosähköllä. Verkkosähkön hinta oli koko päivän ajan korkeampi, kuin aurinkosähkön hinta. Joten optimaalisin tapa oli ladata sähköauto, kun aurinkosähköä oli saatavilla ja se oli mahdollisimman halpaa. Sähköautoa ladattiin kello 4 ja 5 kaikella saatavilla olevalla aurinkosähköllä ja kello 16 autoa ladattiin vielä 5 kWh:lla.

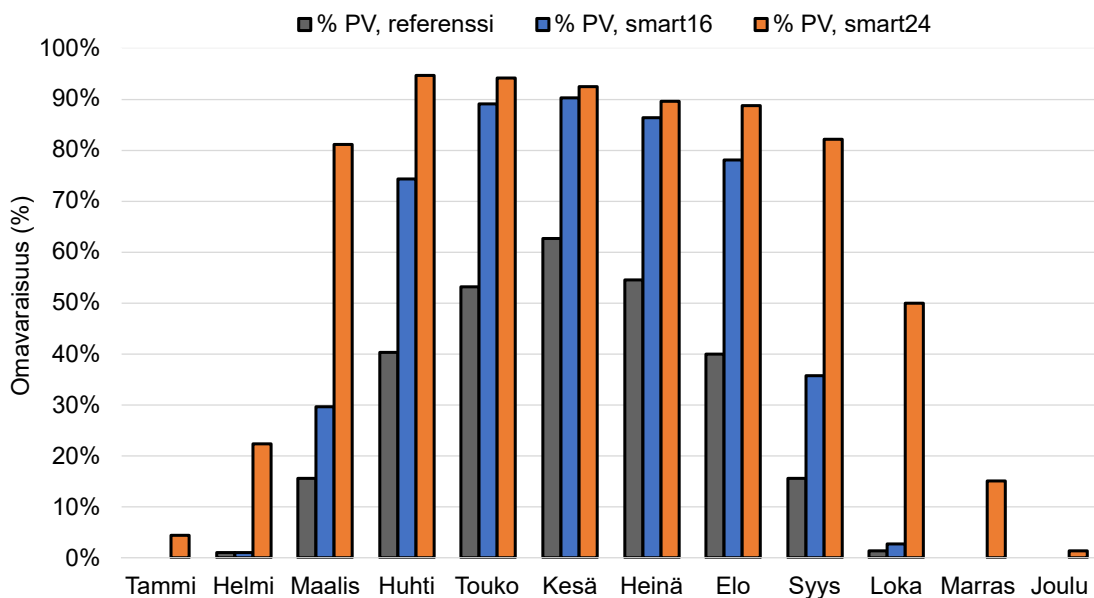
Vuosi myöhemmin, sähkön hinta oli korkeampi. Kuten kuvasta 5b nähdään, sähkön hinta vaihtelee päivän aikana. Päivällä aurinkosähkö oli kalliimpaa, kuin verkkosähkö yöllä. Tämän vuoksi oli kustannustehokkainta ladata sähköauto kokonaan kello 23 verkkosähköllä ja myydä kaikki ylijäämä aurinkosähkö verkkoon.



Kuva 6: Latautumisen jakautuminen optimoiduilla latausjärjestelmillä 2017—2022. a) smart16, kesä b) smart16, talvi c) smart24, kesä d) smart24, talvi.

Kuva 6 esittää, kuinka optimoitu lataus ajoittui keskimäärin yhden päivän aikana vuosina 2017—2022. Kuvat 6a ja 6b esittävät miten sähköauton akun lataus jakautui keskimäärin smart16-latausjärjestelmällä kesällä ja talvella. Kesällä Smart16-

latausjärjestelmällä autoa ladattiin aurinkosähköllä kello neljän ja kahdeksan välillä aamulla ja heti kello 16 jälkeen. Kuvat 6c ja 6d esittävät kuinka akun lataus ajoitui keskimäärin yhden päivän aikana smart24-latausjärjestelmällä kesällä ja talvella. Kesällä smart24-latausjärjestelmällä sähköautoa ladattiin myös kello 8 ja 16 välillä, joten sähköauton lataamiseen pystyttiin käyttämään enimmäkseen aurinkosähköä. Molemmilla latausjärjestelmillä verkkosähköä käytettiin latauksessa pääasiassa talvella. Verkkosähköä käytettiin myös kesällä silloin, kun aurinkosähköä ei ollut saatavilla tai lataaminen verkkosähköllä oli kustannustehokkaampaa. Kuten kuvan 5b esimerkitapauksessa. Molemmilla latausjärjestelmillä sähköautoa ladattiin enimmäkseen verkkosähköllä yöllä kello 23 ja 6 välillä. Kuten kuvassa 3 nähdään, sähkö on ollut halvimmillaan yöllä vuodesta riippumatta.



Kuva 7: Sähköauton kustannusoptimaalisen latauksen omavaraisuus eri latausjärjestelmillä vuosien 2017—2022 aikana.

Simulaatiotulokset osoittivat suuria eroja vuodenaikojen välillä. Kuva 7 näyttää aurinkosähkön osuuden sähköauton latauksessa kuukausittain vuosien 2017—2022 aikana. Vertailussa on mukana kaikki kolme eri lataustapaa. Kuten kuvasta 7 nähdään talvikuukausina aurinkosähkön osuus sähköauton latauksessa on paljon pienempi

kuin verkkosähkön. Smart24-lataussysteemillä aurinkosähköä pystytään hyödyntämään parhaiten talvikuukausina. Aurinkosähkötuoannossa talvikuukaudet ovat lokakuusta helmikuuhun. Referenssi- ja smart24-latausjärjestelmän välillä on merkittäviä eroja aurinkosähkön käytössä. Referenssijärjestelmä käyttää eniten aurinkosähköä kesäkuussa, jolloin sähköautoa ladataan noin 60 % aurinkosähköllä. Smart24-latausjärjestelmällä sähkön omavaraisuus latauksessa viiden parhaan aurinkosähkötuoantokuukauden aikana oli yli 85 %.

Simulaatiotulokset osoittivat, että optimoidulla latausjärjestelmällä voidaan vähentää latauskustannuksia. Taulukossa 2 esitetään latauskustannukset ja vuotuiset säästöt eri latausjärjestelmillä verrattuna referenssijärjestelmään. Tuloksissa on vuosittaisia eroja, jotka johtuvat sähkön hinnan muutoksesta. Kuten kuvasta 3 nähdään, sähkön hinta on noussut viime vuosina. Sähkön hinta on käyttäytynyt keskimäärin päivän aikana samalla tavalla joka vuosi. Hintahuiput ovat aamuisin ja iltaisin. Vuosina 2021 ja 2022 sähkön hinta nousi erityisesti päiväsaikaan. Tämän takia jonain päivinä aurinkosähkö kannatti myydä verkkoon ja ladata sähköauto yöllä halvemmalla verkkosähköllä, kuten kuvan 5b esimerkkitapauksessa. Kuvasta 2 nähdään, että ylijäämä aurinkosähkön määrässä ei ole suuria vuosittaisia eroja.

Taulukko 2: Latauskustannukset eri latausjärjestelmillä, kun sähköautoa ladattiin päivittäin 9 kWh.

Vuosi	Referenssi (€)	Smart16 (€)	Säästö (%)	Smart24 (€)	Säästö (%)
2017	282,3	210,7	25,4	166,1	41,2
2018	337,3	254,0	24,7	211,2	37,4
2019	347,4	253,6	27,0	213,8	38,5
2020	291,7	176,7	39,4	136,3	53,3
2021	512,3	298,1	41,8	264,8	48,3
2022	860,5	416,7	51,6	395,5	54,0

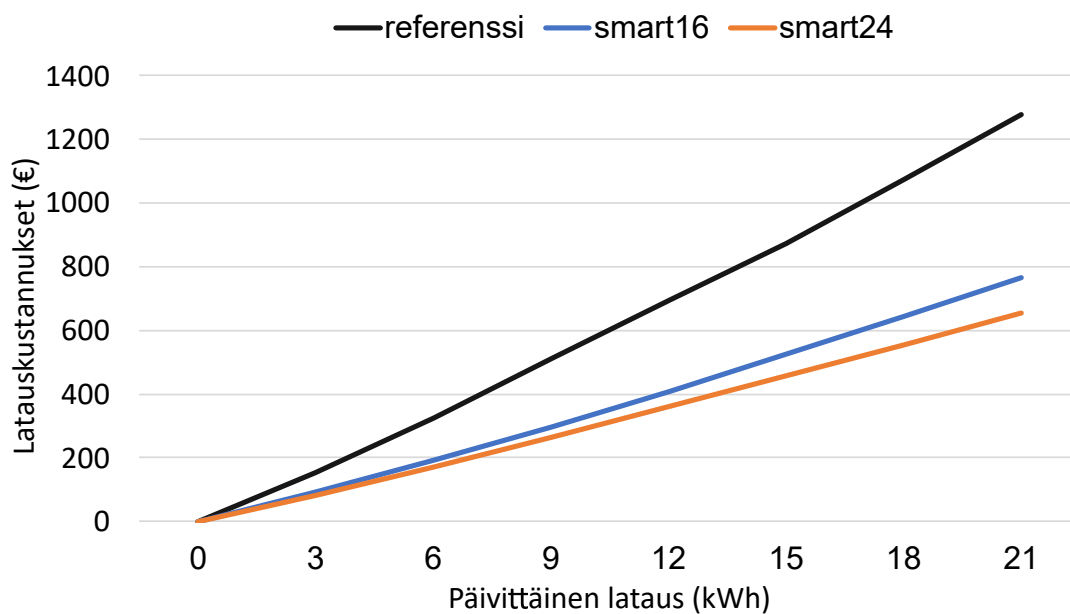
Optimoidulla latauksella voisi säästää 25 %:sta 50 %:iin verrattuna referenssijärjestelmään. Latauskustannukseen vaikutti merkittävästi se oliko autoa mahdollista ladata kello 8—16 välisenä aikana. Kuten kuvasta 2 nähdään, suurin osa aurinkosähköstä tuotetaan päiväsaikaan. Smart16-latausjärjestelmällä vuotuiset säästöt olivat

25—52 % verrattuna referenssijärjestelmään. Smart24-latausjärjestelmällä vuotuiset säästöt olivat 37—54 % verrattuna referenssijärjestelmään. Vuonna 2022 optimoitujen latausjärjestelmien välillä oli vain 2,4 %:n ero. Tämä johtui siitä, että sähkön hinta nousi ja hinta vaihteli yhden päivän aikana enemmän. Silloin edullisin aika ladata oli usein kello 8—16 ajan ulkopuolella. Ilman optimoitua latausjärjestelmää sähköauton latauskustannukset olivat noin 300—860 € , kun akkua ladattiin 9 kWh päivässä.

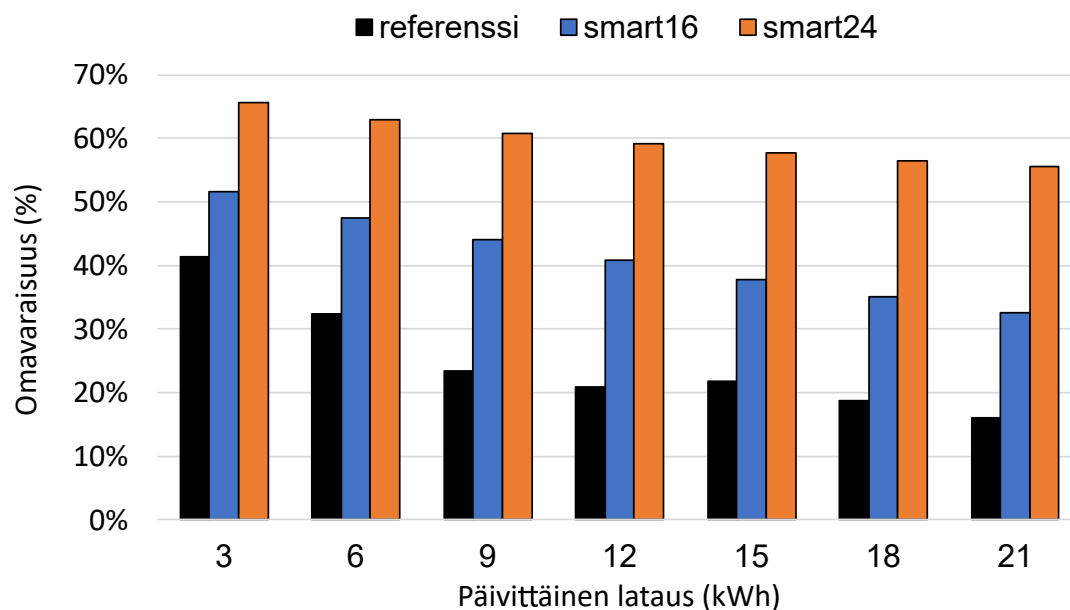
Taulukko 3: Latauskustannukset eri latausjärjestelmillä, kun sähköauton lataukseen ei ollut mahdollista käyttää aurinkosähköä.

Vuosi	Referenssi (€)	Smart16 (€)	Säästö (%)	Smart24 (€)	Säästö (%)
2017	330,6	292,0	11,7	292,0	11,7
2018	396,1	346,7	12,5	346,6	12,5
2019	441,2	341,6	17,0	341,4	17,0
2020	354,8	262,3	26,1	262,1	26,1
2021	580,9	382,6	34,1	381,7	34,3
2022	954,0	463,0	51,5	461,8	51,6

Taulukossa 3 on esitetty vertailun vuoksi latauskustannukset eri latausjärjestelmillä ilman, että latauksessa on pystytty hyödyntämään aurinkosähköä. Tilanteessa on optimoitu lataus ainoastaan sähkönhinnan perusteella. Optimoiduilla latauksilla olisi pystynyt säästämään 12 %:sta 52 %:iin verrattuna referenssilataukseen. Smart16 ja smart24-latausjärjestelmän välillä ei ollut eroja. Tästä pystyy oletamaan, että optimaalisin aika ladata pelkällä verkkosähköllä oli aina kello 8—16 ulkopuolella. Vertailemalla taulukoiden 3 ja 2 tuloksia, huomataan, että aurinkosähköä käyttämällä sähköauton latauksen optimoinnissa on mahdollista säästää 46 eurosta 135 euroon riippuen latausjärjestelmästä ja vuodesta. Pienimmät erot tulosten välillä olivat vuonna 2022, jolloin usein optimaalisin tapa oli käyttää lataukseen verkkosähköä ja myydä aurinkosähkö verkkoon.



(a)



(b)

Kuva 8: Sähköauton päivittäisen lataustarpeen vaikutus latauskustannukseen ja latauksen omavaraisuuteen vuonna 2021. Vertailussa eri latausmenetelmät. a) Vaikutus latauskustannukseen. b) Vaikutus omavaraisuuteen.

Päivittäisen latausmäärän kasvaessa latauskustannukset kasvavat oletetusti, kuten kuvasta 8a nähdään. Tässä vertailussa on käytetty vuoden 2021 sähkön hinta- ja

pohjakulutusdataa. Optimoiduilla latausjärjestelmillä latauskustannukset olivat referenssijärjestelmää alhaisemmat riippumatta latauksen määrästä. Jos sähköautoa ladattaisiin 21 kWh päivässä, smart24-latausjärjestelmän ja referenssijärjestelmän välillä eroa latauskustannuksissa olisi noin 600 euroa. Päivittäisen lataustarpeen kasvaessa myös ero optimoitujen latausjärjestelmien välillä kasvaa. Lataamalla sähköautoa 21 kWh päivässä smart24-latausjärjestelmällä säästää noin 100 euroa verrattuna smart16-latausjärjestelmään. Kuvasta 8b nähdään, että latausmäärän kasvaessa omavaraisuusprosentti ei pysy samana millään latausmenetelmällä. Smart24-latausjärjestelmällä omavaraisuus laskee noin 10 %, kun latausmäärä kasvaa 3 kilowattitunnista 21 kilowattituntiin. Referenssi- ja smart24-järjestelmän välillä on eroa. Smart24-järjestelmällä 21 kWh:n päivittäisellä latausmäärällä, omavaraisuus kasvaa noin 40 % verrattuna referenssijärjestelmään. Vuonna 2021 latausmäärän kasvaessa latauskustannukset olisivat kasvaneet ja omavaraisuus laskenut. Latausmäärän kasvaessa optimoinnin tuomat hyödyt kasvavat. Eri latausjärjestelmien vaikutus aurinkosähkön omakäyttöön on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Aurinkosähkön omakäyttö eri latausjärjestelmillä ja latausmäärillä.

Vuosi	Ilman autoa (%)	Referenssi 9 kWh (%)	Referenssi 18 kWh (%)	Smart16 9 kWh (%)	Smart16 18 kWh (%)	Smart24 9 kWh (%)	Smart24 18 kWh (%)
2017	17,0	21,3	23,9	25,2	30,2	29,9	40,6
2018	16,0	20,3	22,9	24,0	29,1	27,8	38,5
2019	16,5	21,1	23,9	24,9	30,2	28,5	39,1
2020	21,2	25,6	28,4	29,2	34,4	33,3	43,4
2021	20,8	25,2	27,9	29,2	34,1	32,4	42,3
2022	17,9	22,6	25,4	22,6	24,6	24,8	29,9

Simulaatiotulokset osoittivat, että aurinkosähkön omakäyttö kasvoi muutamia prosentteja optimoiduilla latauksilla verrattuna referenssijärjestelmään ja tilanteeseen, jossa sähköautoa ei olisi. 18 kWh päivittäisellä latausmäärällä aurinkosähkön omakäyttö kasvoi verrattuna 9 kWh lataukseen. Vuoden 2022 sähkön hinnan nousun voi nähdä tuloksista, sillä latauksen optimointi ei kasvata aurinkosähkön omakäyttöä samalla tavalla kuin muina vuosina. Vuonna 2022 sähköautoa ladattiin usein pelkällä verkkosähköllä ja aurinkosähkö myytiin verkkoon. Tästä huomataan, että aurinko-

sähkön omakäytön kasvattaminen ei aina tarkoita sähköauton latauskustannusten alenemista.

5 Yhteenveto

Suomessa rekisteröityjen sähköauton ja hybridi-auton määrä on kasvanut nopeasti viime vuosina. Samalla aurinkosähkön osuus Suomen kokonaisenergiatuotannosta on kasvanut. Tässä työssä optimoitiin sähköauton lataus mahdollisimman kustannustehokkaaksi eri optimointijärjestelmillä pienaurinkovoimalan omaavassa omakotitalossa. Lisäksi työssä selvitettiin laskeeko aurinkosähkön omakäytön lisääminen latauskustannuksia.

Latauskustannusten säästöt vaihtelivat 37,4 %:sta vuonna 2018 54,0 %:iin vuonna 2022, kun verrattiin optimaalisinta tapausta eli smart24-latausjärjestelmää referenssijärjestelmään. Sähköautoa ladattiin 9 kWh päivässä mahdollisimman optimaalisesti vuosina 2017—2022. Tätä koko päivän latausmenetelmää ei kuitenkaan voida pitää realistisena, koska sähköauton käyttäjän olisi noudatettava optimaalista latausaikataulua. Tulokset, jotka saadaan optimoimalla lataus kello 8—16 välisen ajanjakson ulkopuolella, vaikuttavat realistisemmilta reaalimaailmaan sopeutumisen kannalta.

Todenmukaisemmat optimointitulokset saadaan, kun sähköautoa ei ole mahdollista ladata kello 8—16 välisenä aikana ja sähköauton lataustarve on 9 kWh päivässä. Tällä optimoinnilla kustannussäästöt olivat 24,7 %:sta vuonna 2018 51,6 %:iin vuonna 2022 vuosien 2017—2022 välillä. Tällä menetelmällä aurinkosähkön omakäyttö oli 24,0 % vuonna 2018 ja 22,6 % vuonna 2022. Simulointitulokset osoittivat myös, että mitä enemmän sähköautoa on ladattava päivittäin, sitä kustannustehokkaamaksi optimointi tulee. Latausmäärän kasvattaminen ei kuitenkaan suoraan tarkoita latauksen omavaraisuuden kasvamista. Sähkön hinta ja ylijäämä aurinkosähkön määrä vaikuttaa siihen, mikä on optimaalisin tapa ladata sähköauto.

Kun sähköautoa ladataan osissa usealla eri tunnilla, on akun ylimääräinen heikkeneminen todennäköistä, koska sitä ei saada ladattua täyteen yhdellä käynnistys- ja pysäytysjaksolla (Martel et al. 2016). Tätä ei tapahdu hallitsemattomalla latauksella, mutta optimoidulla latauksella on päiviä jolloin sähköautoa ei ladata täyteen yhdellä kertaa, vaan lataus ajoittuu useammalle tunnille. On mahdollista, että tämä aiheuttaa sähköauton omistuskuluihin nousua, koska akku on ladattava useammalla kuin yhdellä käynnistys- ja pysäytysjaksolla. Tätä ei kuitenkaan otettu huomioon tässä tutkimuksessa. Ei myöskään huomioitu sitä, että kylmällä säällä sähköauton akku on ensin lämmitettävä, ennen kuin se voi ottaa täyden 11 kWh tehon, jonka laturi antaa. Molempia näistä seikoista voitaisiin tutkia tarkemmin tulevaisuudessa.

Toinen näkökulma, jota voitaisiin myöhemmin tutkia, on mahdollisuus toteuttaa V2G-järjestelmä tämän tutkimuksen tulosten perusteella. Joissakin uudemmissa sähköautomalleissa on V2G-järjestelmä, ja se voitaisiin sisällyttää tämän tutkimuksen optimointijärjestelmään, mikä voisi mahdollisesti vähentää latauskustannuksia entisestään.

Kun harkitaan tämän tutkimuksen tulosten käyttöä pelkän simuloinnin ulkopuolella, on otettava huomioon, että käytettiin niin sanottua "täydellistä sääennustetta". Tämä tarkoittaa, että käytettiin aiemmin mitattuja aurinkosähkötietoja. Knuutinen ym. tutkimus osoitti kuitenkin, että todellinen aurinkosähköennuste ei merkittävästi eroa tuloista täydelliseen ennusteeseen verrattuna, mutta se olisi silti pidettävä mielessä (Knuutinen et al. 2021). Van der Meer ym. kaltaisia tutkimuksia on jo tehty aurinkosähköenergian tuotannon ennustamiseen kykenevä järjestelmä (van der Meer et al. 2018).

Tässä tutkimuksessa havaittujen taloudellisten hyötyjen saamiseksi peruskulutus täytyisi myös ennustaa täydellisesti. Tämän ei pitäisi olla ongelma Suomessa, koska yli 99 prosentilla suomalaisista verkkoasiakkaista on jo älymittarit, jotka mittaavat heidän energiankulutustaan (energy agency 2018). Peruskulutuksen ennustamiseen on tehty myös algoritmeja, kuten Sun ym. tutkimuksessa (Sun et al. 2020).

Ennustusalgoritmit eivät kuitenkaan välttämättä ole tarpeen, koska aiempia tietoja voidaan käyttää energiankulutuksen ennustamiseen yhden tunnin tarkkuudella. Kuten aina, minkä tahansa algoritmin tai ennustemallin käyttö tuo aina epävarmuuskijöitä järjestelmään. Tämä tutkimus osoittaa suurimman mahdollisen potentiaalin, joka voidaan saavuttaa.

Simolin ym. tutkimuksessa otetaan huomioon latureiden energiahäviöt (Simonlin 2022). Tätä ei kuitenkaan tarkasteltu tässä työssä. Kuten kuvasta 8a nähdään, optimoitu lataus on kuitenkin sitä kustannustehokkaampaa, mitä suurempi on sähköauton lataustarve. Samaa voidaan sanoa sähköauton akun lämmittämiseen talviaikaan tarvittavasta energiasta. Se lisää latausenergian tarvetta ja tekee optimoidusta latauksesta entistäkin kustannustehokkaampaa.

6 Johtopäätökset

Sähköautojen ja yksityisomistuksessa olevien pienimuotoisten aurinkosähköjärjestelmien määrä kasvaa nopeasti. Tämä tutkimus osoitti, että sähköautojen latauskustannuksia voidaan vähentää optimoimalla lataus sähkön hinnan, sään ja kotitalouksien peruskulutuksen perusteella. Simulointitulokset vuosilta 2017—2022 osoittivat, että latauskustannuksissa voitaisiin säästää jopa yli 50 % verrattuna referenssinä käytettyyn latausjärjestelmään. Pelkästään aurinkosähköenergian omakäytön lisäämisellä ei saavuteta kustannustehokkainta latausta. Optimaalisin tapa ladata sähköauto vaihtelee päivittäin. Lataus on ajoitettava sähkön hinnan ja odotettavissa olevan ylijäämä aurinkosähkön saatavuuden mukaan.

Viitteet

Datta, U., Saiprasad, N., Kalam, A., Shi, J. & Zayegh, A. (2019), 'A price-regulated electric vehicle charge-discharge strategy for g2v, v2h, and v2g', *International journal of energy research* **43**(2), 1032–1042.

Energiavirasto (2022a), 'Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021'. 12.01.2023.

URL: <https://energiavirasto.fi/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>

Energiavirasto (2022b), 'Finnish energy agency'. 06.07.2022.

URL: <https://energiavirasto.fi/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-kasvoi-45-prosenttia-vuonna-2020-pientuotantoa-lahes-300-megawattia>

energy agency, F. (2018), 'National report 2018 to the agency for the cooperation of energy regulators and to the european commission'. 06.07.2022.

Fachrizal, R. & Munkhammar, J. (2020), 'Improved photovoltaic self-consumption in residential buildings with distributed and centralized smart charging of electric vehicles', *Energies (Basel)* **13**(5), 1153–.

García-Villalobos, J., Zamora, I., San Martín, J., Asensio, F. & Aperribay, V. (2014), 'Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches', *Renewable & sustainable energy reviews* **38**, 717–731.

Gjelaj, M., Hashemi, S., Andersen, P. B. & Traeholt, C. (2020), 'Optimal infrastructure planning for ev fast-charging stations based on prediction of user behaviour', *IET electrical systems in transportation* **10**(1), 1–12.

IEA (2022), 'Global electric car sales have continued their strong growth in 2022 after breaking records last year'. 14.07.2022.

URL: <https://www.iea.org/news/global-electric-car-sales-have-continued-their-strong-growth-in-2022-after-breaking-records-last-year>

- Knuutinen, J., Böök, H., Ruuskanen, V., Kosonen, A., Immonen, P. & Ahola, J. (2021), 'Ground source heat pump control methods for solar photovoltaic-assisted domestic hot water heating', *Renewable energy* **177**, 732–742.
- Kosonen, A. & Keskiisaari, A. (2020), 'Zero-energy log house – future concept for an energy efficient building in the nordic conditions', *Energy and Buildings* **228**, 110449.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820305429>
- Lacey, G., Putrus, G. & Bentley, E. (2017), 'Smart ev charging schedules: supporting the grid and protecting battery life', *IET electrical systems in transportation* **7**(1), 84–91.
- Liu, X., Wu, Y. & Wu, H. (2021), 'Pv-ev integrated home energy management considering residential occupant behaviors', *Sustainability (Basel, Switzerland)* **13**(24), 13826–.
- Luthander, R., Shepero, M., Munkhammar, J. & Widén, J. (2019), 'Photovoltaics and opportunistic electric vehicle charging in the power system – a case study on a swedish distribution grid', *IET renewable power generation* **13**(5), 710–716.
- Ma, T. & Mohammed, O. A. (2014), 'Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car-park infrastructure', *IEEE transactions on industry applications* **50**(4), 2323–2330.
- Martel, F., Dube, Y., Kelouwani, S., Jaguemont, J. & Agbossou, K. (2016), 'Long-term assessment of economic plug-in hybrid electric vehicle battery lifetime degradation management through near optimal fuel cell load sharing', *Journal of power sources* **318**, 270–282.
- MathWorks (2022), 'Matlab'. viewed 05.08.2022.
URL: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>
- Nord Pool (2022). 06.07.2022.
URL: <https://www.nordpoolgroup.com/>

- Petrusic, A. (2021), 'Renewable energy tracking and optimization in a hybrid electric vehicle charging station', *Applied sciences* **11**(1), 245–.
- Simolin, T., Rauma, K., Järventausta, P. & Rautiainen, A. (2020), 'Optimised controlled charging of electric vehicles under peak power-based electricity pricing', *IET Smart Grid* **3**(6), 751–759.
- Simonlin, T. (2022), *Electric Vehicle Charging Load Management - Algorithm and Modelling Perspectives*, PhD thesis, Tampere University.
URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2505-3>
- Statfin (2020), 'Number of kilometres driven with cars in 2019 unchanged from the year before – kilometres for heavy vehicles decreased'. 5.08.2022.
URL: https://www.stat.fi/til/tiet/2019/tiet_2019_2020-04-15_tie_01_en.html
- Statista (2022), 'Annual solar module production globally from 2000 to 2020'. 14.07.2022.
URL: <https://www.statista.com/statistics/668764/annual-solar-module-manufacturing-globally/>
- Sun, L., Wei, Q., He, L. & Yin, Z. (2020), 'The prediction of building heating and ventilation energy consumption base on adaboost-bp algorithm', *IOP conference series. Materials Science and Engineering* **782**(3), 32008–.
- Thygesen, R. & Karlsson, B. (2014), 'Simulation and analysis of a solar assisted heat pump system with two different storage types for high levels of pv electricity self-consumption', *Solar energy* **103**(May 2014), 19–27.
- Tilastokeskus (2022), 'Statistics finland - vehicle fleet'. 06.07.2022.
URL: https://www.stat.fi/til/mkan/2021/mkan_2021_2022-03-01_tie_01_fi.html
- Valtioneuvos (2021), 'Act on purchase and conversion subsidies for low-emission vehicles into force'. 14.07.2022.
URL: <https://valtioneuvosto.fi/en/-/act-on-purchase-and-conversion-subsidies-for-low-emission-vehicles-into-force/>

van der Meer, D., Munkhammar, J. & Widén, J. (2018), 'Probabilistic forecasting of solar power, electricity consumption and net load: Investigating the effect of seasons, aggregation and penetration on prediction intervals', *Solar energy* **171**, 397–413.

Wang, H., Zhou, W., Qian, K. & Meng, S. (2019), 'Modelling of ampacity and temperature of mv cables in presence of harmonic currents due to evs charging in electrical distribution networks', *International journal of electrical power & energy systems* **112**, 127–136.