



Matti Niemi

Sähköauton lataus aurinkosähkö- energialla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

1.6.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Matti Niemi
Otsikko: Sähköauton lataus aurinkosähköenergialla
Sivumäärä: 67 sivua
Aika: 1.6.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja: Lehtori Vesa Sippola

Opinnäytetyö tehtiin kiinnostuksesta, soveltuuko aurinkosähköenergia sähköautojen lataamiseen. Tavoitteena oli saada käsitys mikrotuotantolaitoksen kokoluokan aurinkosähkövoimalan soveltuvuudesta sähköauton lataukseen ja saada selvyys, mitkä asiat vaikuttavat sen hyödyntämiseen ja kuinka paljon. Lisäksi työssä tutkittiin todellisen kohteen soveltuvuutta sähköauton lataukseen.

Tutkimusta varten luotiin Excel-pohjainen laskentatyökalu, jolla simuloitiin aurinkosähkövoimalan tuotantoa sekä sähköauton kulutusta vuoden mittaisella ajanjaksoilla. Tutkimusta varten tutustuttiin tilastoihin, sähköautojen lataukseen sekä aurinkosähkövoimalan tuotantolaitteiden teknisiin tietoihin. Simuloinneilla tuotiin erilaisten muuttujien vaikutukset esille ja niistä luotiin havainnollistavia kuvaajia.

Tuloksista pääteltiin, että useissa tapauksissa sähköauton lataukseen tarvittava energia on mahdollista tuottaa kesäkaudella täysin aurinkosähköllä, kun taas talvikaudella on tukeuduttava miltei täysin muihin sähkönlähteisiin. Parhaimmat tulokset saavutetaan energiavarastoa hyödyntämällä, mutta päiväaikaisella latauksella energiavarastoa ei tarvita.

Avainsanat: aurinkosähkö, mikrotuotantolaitos, aurinkopaneeli, sähköauto, sähköauton kulutus, sähköauton lataustavat, kotilatausasema, latausteho

Abstract

Author: Matti Niemi
Title: Charging EV using Solar Energy
Number of Pages: 67 pages
Date: 1 June 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisor: Vesa Sippola, Senior Lecturer

The thesis work was carried out to clarify whether solar electric energy is suitable for charging electric cars. The goal was to produce a comprehensive understanding of the suitability of a solar microgeneration for charging an electric car and to get clarity on what factors affect its utilization and to what extent. In addition, the work investigated the suitability of the existing installation for electric car charging.

An Excel-based calculation tool was created for the study, simulating the production of a solar power plant and the consumption of an electric car over a year-long period. For the study, statistics, charging of electric cars, and technical data of solar electricity were familiarized with. With simulations, the effects of various variables were presented, and illustrative graphs were created concerning these variables.

As result, it was concluded that in several cases the energy needed to charge an electric car can be produced entirely with solar electricity in the summer season, while in the winter season it is necessary to rely almost entirely on other sources of electricity. The best results are achieved by utilizing the energy storage, but with day-time charging, the energy storage is not needed.

Keywords: Solar electricity, microgeneration, solar panel, electric car, electric car consumption, electric car charging methods, home charging station, charging power

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkosähkö	2
3	Aurinkosähkövoimala	4
3.1	Vaihtosuuntaaja	6
3.2	Aurinkopaneelit	9
3.3	Akut aurinkosähkövoimalan rinnalle	10
4	Sähköauton lataus	12
4.1	Tyypilliset lataustavat	12
4.2	Latausajat ja akuston käyttöikä	14
4.3	Sähköauton kulutus	16
5	Tutkimuksen toteutus	17
5.1	Tilastot ja raja-arvot	18
5.2	Simuloinnin perusjärjestelmä	19
5.3	Sähköauton kulutusmallit	19
5.4	Päivärutiinien simulointi viikkoprofiilien avulla	21
5.5	Aurinkosähkövoimalan häviöt	26
6	Tuloksia	27
6.1	Aurinkosähkövoimalan nimellistehon vaikutus	27
6.2	Latausajankohdan vaikutus	30
6.3	Talouseläminen	33
6.4	Lataustehon vaikutus	37
6.5	Etätyöskentely	39
6.6	Ajomatkat	40
6.7	Aurinkopaneelien ilmansuunnat	44
6.8	Akkuja hyödyntävä aurinkosähköjärjestelmä	45
6.9	Aurinkosähkön käyttämätön potentiaali	49
6.10	Tuloksien yhteenveto	53
7	Tutkittava aurinkosähköjärjestelmä	55

7.1	Simuloinnin tulokset	58
7.2	Päätelmä	62
8	Yhteenveto	64
	Lähteet	65

Lyhenteet ja käsitteet

BMS: *Battery Management System*. Akunvalvontajärjestelmä.

Mikrotuotantolaitos:

Enintään 100 kVA:n aurinkosähkövoimala.

MPPT: *Maximum Power Point Tracking*. Maksimitehopisteen seuraaja.

PV: *Photovoltaic*. Tarkoitetaan aurinkosähköä.

PWM: *Pulse Width Modulation*. Pulssinleveysmodulaatio.

SoC: *State of charge*. Ilmoittaa akun jäljellä olevan kapasiteetin prosenttilukuna alkuperäiseen kapasiteettiin nähden.

V_{oc} : *Open Circuit Voltage*. Avoimen piirin jännite, tyhjäkäyntijännite.

WLTP: *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*. Maailmanlaajuisesti yhtenäistetty testimenetelmä, jolla ilmoitetaan auton kulutus.

W_p : Aurinkosähkössä huipputeho, piikkiteho ja nimellisteho ilmoitetaan piikkiwatteina tai huippuwatteina. Ilmoitettu teho on mitattu standarditestiolosuhteissa.

1 Johdanto

Aurinkosähköenergia on yksi uusiutuvista energiamuodoista, jonka tuotantoon on tavallisen kuluttajan helppo ryhtyä. Vuosien varrella järjestelmien hinnat ovat tippuneet, ja asennuspalvelua on helposti saatavilla. Asennuksen esteettinen lopputulos ja taloudellisen hyödyn mahdollisuus houkuttelevat yhä useampia investoimaan aurinkosähkövoimalaan. Aurinkosähkövoimaloissa asennuksen helppous suosii asuinmuodoista etenkin omakotitaloja, sillä vaikka aurinkopaneelien hyötysuhde on kasvanut vuosi vuodelta, vaativat ne kohtalaisen ison tilan, yleisimmin katolta. Investoinnin tarkoituksena voi olla sähkölaskun pienentäminen, omavaraisuus, ympäristöajattelu tai näiden yhdistelmä.

Ympäristöajattelua ohjataan myös EU-tasolta ja tällä hetkellä on määritelty uusien henkilö- ja pakettiautojen olevan päästöttömiä vuodesta 2035 alkaen [1]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lähitulevaisuudessa uudet henkilö- ja pakettiautot liikkuvat nykyhetken tekniikalla joko vedyllä tai akkuihin varastoidulla sähköenergialla. Mutta koska siirtymäaikaa on kohtalaisen vähän, on pidettävä mahdollisena, että päätöksiä joudutaan muuttamaan

Insinööriyössä tutkittiin, kuinka paljon aurinkosähköä voi hyödyntää sähköauton latauksessa. Työssä tutkittu aurinkosähkövoimala soveltuisi esimerkiksi omakotitaloon asennettavaksi eli on kokoluokaltaan alle 100 kVA:n mikrotuotantolaitos. Sähköautoilu kohdennettiin työmatkatarpeisiin niin että arkipäivinä ajetaan 40–100 km. Työssä luotiin Excel-pohjainen simulointityökalu, joka simuloi aurinkosähkövoimalan tuotantoa ja sähköautoilijan ajorutiineja yhden vuoden ajalle tunnin tarkkuudella. Simulointi pohjautui aurinkosähkötuotannon osalta EU:n Joint Research Centerin PVGIS -laskentatyökaluun [2]. Sähköautoilussa tukeuduttiin tilastotietoihin, valmistajien ilmoittamiin arvoihin sekä internetistä löytyneiden artikkeleiden mukaisin käytännön havaintoihin. Työssä ei käsitelty aurinkosähkövoimalan rakentamiseen liittyvää sähköturvallisuutta, lakeja tai standardeja.

Tutkimuksessa pyrittiin havainnollistamaan, mitkä seikat vaikuttavat sähköauton lataukseen aurinkosähköllä ja kuinka paljon. Työssä vertailtiin sähköverkkoon liitettyä ja akkuvarastoa hyödyntävää aurinkosähköjärjestelmää sekä sähköauton arkirutiinien ja lataustehon vaikutusta. Simulointityökalulla tutkittiin myös yhtä todellista aurinkosähkövoimalaa ja arvioitiin järjestelmän soveltuvuutta asukkaan sähköautoilulle.

2 Aurinkosähkö

Suomessa auringosta säteilevää energiaa on vuoden aikana saatavilla noin 1000 kilowattituntia neliometriä kohden riippuen maantieteellisestä sijainnista (leveyspiiri) [3, s. 14]. Aurinkogosta säteilevä energia voidaan muuttaa aurinkopaneelilla sähköksi, mutta sähköenergiaksi muuttuu tyypillisesti vain noin 15–20 % paneelien heikon hyötysuhteen vuoksi [3, s. 142]. Parhaimmat tuotantokuukaudet ovat alkukeväästä alkusyksyyn. Talviaikana aurinko paistaa lyhyemmän aikaa ja lähes vaakasuorassa kulmassa. Talvella tuotantoa ei ole käytännössä ollenkaan, etenkin jos aurinkopaneelit on asennettu kiinteästi loivalle harjakatolle.

Verkkoon liitettyjen aurinkosähkövoimaloiden sähkön myyntiä on tuntinetotuksella saatu järkevämmäksi. Tuntinetotuslaskenta on voimassa kaikkialla vuoden 2023 alusta lähtien, jolloin tunnin sisällä verkosta tulevan ja verkkoon päin siirretyn sähkön määrät summataan. Sähkölaskun kannalta enää ei tarvitse huomioida vaiheiden välistä epätasapainoa, sillä kaikki summataan yhteen. [4.]

Sähköverkkoon myytävästä energiasta maksetaan yleensä pohjoismaisen sähköpörssin ilmoittama tuntikohtainen Suomen hinta-alueen hinta, spot-hinta. Osto- ja myyntihinnassa on kuitenkin merkittävä ero silloin, kun siirtomaksut ja verot otetaan huomioon. Esimerkiksi jos tunnin aikana tuotantoa on enemmän kuin kulutusta, verkkoon myydään spot-hinnalla. Sähköverkkoon myytävästä energiasta saatetaan vähentää vielä sähköyhtiön välityspalkkio. Kun kulutus on suurempi, ostettavan energian hinnan lisäksi maksetaan siirtomaksua ja sähköveroa. Myyntihinta voi olla jopa vain 1/3 ostohinnasta. [5.]

Spot-hintatilastoista [6] piirretystä kuvaajasta (kuva 1) voidaan havaita, että hinta on kesäkuukausina keskimääräisesti halvempi kuin talvikaudella. Tämä omalta osaltaan heikentää aurinkosähkövoimalan myyntituottoa.



Kuva 1. Kuukausikohtainen hintavaihtelu vuoden keskiarvoon verraten, tilastot vuosilta 2012–2020 [6].

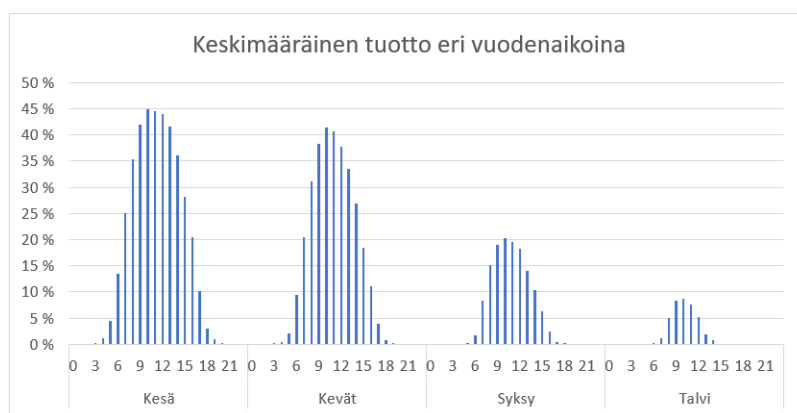
Suomessa siirrytään varttitaseen käyttöön 22.5.2023 [7]. Kuluttajille tämä näkyy luultavasti muutaman vuoden viiveellä [8]. Vaihtelevalla pohjakuormalle varttitase voi aiheuttaa taloudellista menetystä, mutta sähköauton latauksessa sen merkitys jää vähäiseksi.

3 Aurinkosähkövoimala

Tämän työn tutkimuskohteena ovat asuinrakennusten mikrotuotantolaitokset, joissa vaihtosuuntaaja on liitetty sähköverkkoon, tai sähköverkkoon liitetyn vaihtosuuntaajan rinnalla on myös akut. Tämän luvun kuvaajat perustuvat PVGIS-laskentatyökalulla [1] tuotettuun tietoon Sipoon alueella.

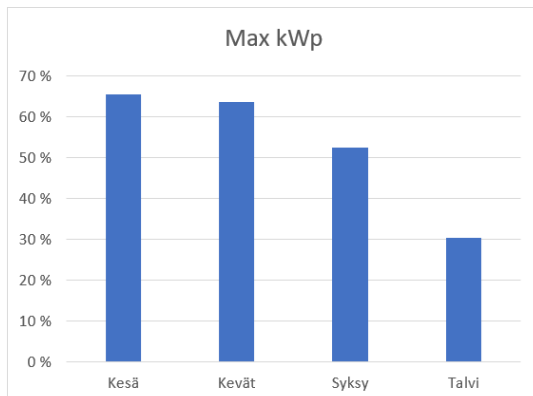
Sähkön kuluttajahinnat ovat Tilastokeskuksen [6] keräämien tietojen mukaan olleet reilun vuosikymmenen aikana nousussa. Aurinkosähkövoimalan tuotannolla on mahdollista vähentää sähkön ostotarvetta, mikäli kulutusta on aurinkoiseen aikaan. Vuoden 2023 aikana ollaan siirtymässä tiuhempaan varttitaseen käyttöön, joka tulee näkymään viiveellä myös kuluttajille [7]. Siirtymän jälkeen sähkön kulutus- ja aurinkosähkövoimalan tuotantolukemat siirtyvät sähkömittarilta 15 minuutin jaksoissa. Sähköauton lataus on tyypillisesti pitkäkestoista, minkä vuoksi vartin jaksoihin siirtyminen ei tuo muutoksia nykyiseen tuntijaksoon verraten.

Aurinkosähköenergian tuotanto eri vuodenaikoina vaihtelee erittäin suuresti. Kiinteästi asennettujen aurinkopaneelien optimaalinen kallistuskulma Suomessa on noin 45° [3, s. 18]. Etelään kohdistetut aurinkopaneelit katolla, joka on kaltevuudeltaan noin 27° , tuottavat sähköä kesän ja kevään aikana selkeästi muita vuodenaikoja paremmin. Kallistuskulma ei ole optimaalinen. Kuvasta 2 nähdään tuntikohtainen keskimääräinen sähköntuotto eri vuodenaikoina suhteessa aurinkopaneelin nimellistehoon eli W_p -tehoon.



Kuva 2. Tuntikohtainen keskimääräinen tuottoprosentti eri vuodenaikoina.

Kuvasta 3 nähdään, kuinka aurinkopaneelin asennus on kaukana optimiolosuhteista, kun aurinkopaneeli on suunnattu etelään ja kaltevuudella noin 27°. Kesällä aurinkopaneeleista saadaan parhaimmillaankin vain alle 70 % nimellistehosta. Kevään maksimituotto ei jää kesästä kauas.



Kuva 3. Maksimiteho nimellistehoon verraten eri vuodenaikoina, kun aurinkopaneeli suunnattu etelään kaltevuudella 27°.

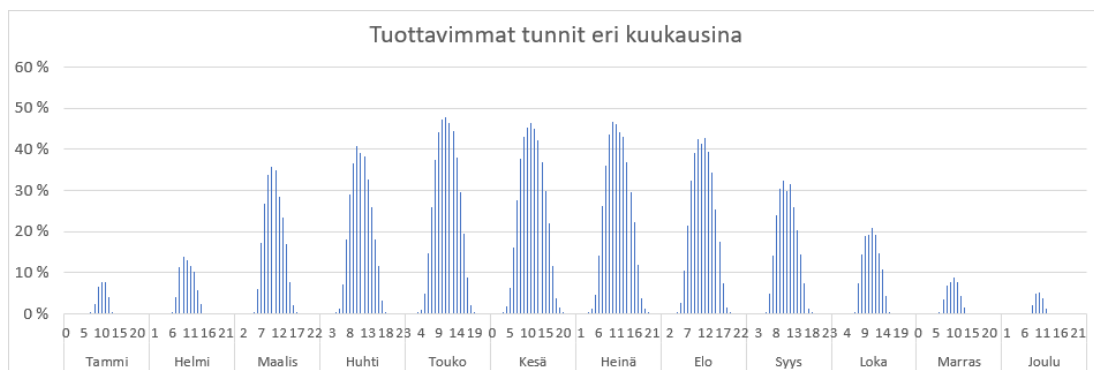
Sähköenergian tuotannon parhaat tuotantotunnit ovat aamupäivän ja keskipäivän aikana. Vuoden aikana keskipäivän keskimääräinen tuotanto jää alle 30 %:n johtuen pääosin talven synkkyudesta (kuva 4).



Kuva 4. Parhaimmat aurinkosähköenergian tuotantoajat.

Vuoden aikana aurinkosähköenergian tuotanto vaihtelee hyvinkin paljon. Kesällä aurinkosähköenergiaa on hyvin saatavilla, kun taas talvella aurinko paistaa

matalammalta ja vähemmän aikaa. Sähköautoilun kannalta tämä tarkoittaa sitä, että talvikuukausina on tukeuduttava muuhun sähköntuotantoon käytännössä kokonaan. Kuvasta 5 voidaan havaita, että kuukausitasolla touko-, kesä-, heinä- ja elokuun aurinkosähkötuotannot ovat lähes tasavertaisia.



Kuva 5. Kuukausikohtainen keskimääräinen aurinkosähköenergian tuotanto.

3.1 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja on tyypillisesti osana järjestelmää, kun tarvitaan vaihtosähköä. Vaihtosähkö voi olla modifioitua siniaaltoa tai aitoa siniaaltoista yksi- tai kolmi-vaiheista. Vaihtosuuntaajista puhuttaessa on karkeasti kaksi vaihtoehtoa, akuista vaihtosähköä tuottava ja sähköverkkoon liitettävä vaihtosuuntaaja. Akuista otetun tasasähkön vaihtosuuntausta käytetään pääsääntöisesti off-grid-järjestelmissä, joita käytetään esimerkiksi mökkikäytöissä. Tällaista vaihtosuuntaajaa kutsutaan myös invertteriksi. Off-grid-järjestelmät on rajattu työstä pois. Tässä työssä vaihtosuuntaajalla tarkoitetaan joko verkkoon liitettävää tai verkon rinnalla toimivaa yhdistelmävaihtosuuntaajaa. Verkkoon liitettyä vaihtosuuntaajaa kutsutaan myös verkkoinvertteriksi. Tämän tyyppinen vaihtosuuntaaja tahdistaa itsensä sähköverkkoon ja sisältää sähköverkon kannalta olennaisia turvallisuustoimintoja. [9, s. 75, 78, 80.]

Vaihtosuuntaajan tehtävänä on muuttaa aurinkopaneeleilta tuleva tasavirta vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaajan teho määrittää sen, kuinka paljon aurinkosähköjärjestelmästä voidaan käyttää tehoa. Aurinkopaneeliston piikkiteho voi mitoituksessa olla enemmän kuin vaihtosuuntaajan teho, jos jännitearvot pysyvät

koko järjestelmän osalta laitevalmistajien määrittämässä arvoissa. Aurinkopaneeliston tuotanto, joka on vaihtosuuntaajan tehoa suurempi, jää hyödyntämättä.

Verkkoon liitettyjen 3–27 kW:n vaihtosuuntaajien avoimen jännitteen maksimi on tavallisesti 800–1000 V tasasähköä. Avoimella jännitteellä tarkoitetaan aurinkopaneelin jännitettä, kun siihen ei ole kytketty kuormaa. Vaihtosuuntaajan avoimen jännitteen maksimi määrittää, kuinka monta aurinkopaneelia on mahdollista kytkeä sarjaan. Avoin jännite ei saa olla aurinkopaneelille määriteltyä maksimijännitettä suurempi. Suuri jännite mahdollistaa pienemmän virran, minkä vuoksi johdinpoikkipinta-alat pysyvät kohtuullisina.

Verkkoon liitetyissä järjestelmissä vaihtosuuntaaja toimii käyttökuormasta riippumatta aina aurinkopaneelien tuoton mukaisesti, mutta korkeintaan maksimitehollaan. Toimintaperiaatteesta johtuen aurinkopaneeleita voidaan asentaa tehollisesti enemmän kuin vaihtosuuntaajan nimellisteho. Jos vaihtosuuntaajan teho ei riitä, silloin ylimenevä osa aurinkopaneelien tuotannosta jää hyödyntämättä. Tästä syystä tarpeettoman suuri ylimitoitus ei ole taloudellisesti kannattavaa. Aurinkopaneeliston asennussuuntien perusteella voidaan arvioida maksimituotto ja mitoittaa tähän sopiva vaihtosuuntaaja. Esimerkiksi tutkittavan kohteen (luvussa 7) aurinkopaneeleissa asennussuuntien ja sijainnin kanssa saavutetaan parhaimmillaan vain 65 % aurinkopaneelin W_p -arvosta.

Suurin osa omakotitaloihin tarkoitetuista aurinkosähkövoimaloista liitetään valtakunnan sähköverkkoon, ja tämä on mahdollista vain siihen soveltuvalla vaihtosuuntaajalla. Yksi tärkein ominaisuus sähköverkkoon liitetyn vaihtosuuntaajan toiminnoista on, että sen on katkaistava sähkönsyöttö, mikäli sähköverkon syöttö katkeaa [9, s. 80]. Suojausmekanismin on tarkoitus estää vikaantuneen sähköverkon takasyöttö, joka on pahimmassa tapauksessa hengenvaarallinen. Tällä järjestelmällä ei sähkökatkon aikana voida tuottaa sähköä.

Mikäli vaihtosuuntaajalla ei syötetä verkkoon päin sähköä, on siihen tyypillisesti liitetty akusto. Tämän tyyppistä järjestelmää kutsutaan itsenäiseksi, off-grid- tai

saarekejärjestelmäksi. Järjestelmä sopii käytettäväksi esimerkiksi mökeillä tai paikoissa, mihin sähkönsyöttöä ei kannata järjestää.

Lisäksi vaihtosuuntaajista löytyy myös verkkoon liitetyn ja saarekejärjestelmän yhdistelmä. Laitteessa on kaksi lähtöä, jossa toinen lähdeistä syöttää verkkoon ja toinen toimii verkkovian aikana saarekejärjestelmänä akkuja hyödyntämällä. Normaalitylanteessa molemmat ovat toiminnassa.

Vaihtosuuntaajan hyötysuhde vaihtelee 96–99 % riippuen mallista [10]. Vaihtosuuntaaja, johon on liitetty akku sähköenergian varastointiin, on kokonaisyhyötysuhteeltaan hiukan alhaisempi. Sellaisessa hyötysuhde voi olla 90 % [9, s. 77]. Tämä johtuu pääosin siitä, että energia hukataan akkujen latauksessa sekä niiden käytössä [9, s.66]. Tilanteessa, missä aurinkosähköenergiaa käytetään samaan aikaan kun tuotetaan, parantaa kokonaisyhyötysuhdetta, kun akkujen lataus- ja purkuvälivaihe jää osin pienemmäksi.

Vaihtosuuntaus voi olla joko modifioitua sinijännitettä tai aitoa sinijännitettä [9, s. 75, 77]. Vaihtosuuntaaja sisältää maksimitehopisteen seuraajan aurinkopaneelille. Maksimitehopisteen seuraajan eli MPPT:n avulla aurinkopaneelien ulostulojännitettä säädetään parhaimman tehon saavuttamiseksi. Yhteen MPPT-säätimeen kytketyt aurinkopaneelit tulee sijoittaa saman suuntaisesti ja saman valoisuuden mukaisesti. Aurinkopaneelin asennuspaikan valoisuus voi vaihdella heijastuksen tai varjostuksen vuoksi. Pienikin varjostus aiheuttaa tehon menetyksen koko paneeliketjun osalta. Markkinoilla on vaihtosuuntaajia, joissa MPPT-säätimiä on kaksi. Tämä tarkoittaa, että aurinkopaneeleja voidaan sijoittaa esimerkiksi rakennuksen harjakaton molemmille lappeille. [9, s. 74, 93.]

Aurinkopaneelikohtainen mikroinvertteri siirtää jokaisen yksittäisen paneelin tuottaman sähköenergian sähköverkkoon. Mikroinvertterikäytössä yksittäisen paneelin varjostuminen ei aiheuta tehon menetystä koko aurinkopaneeliketjussa [3, s. 147].

3.2 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelin kyky muuttaa auringon säteily sähköenergiaksi riippuu monesta tekijästä. Keskeiset vaikuttavat asiat paneelin asennuksen osalta ovat ilmansuunta, kallistuskulma, varjostukset sekä paneelin lämpötila. Lisäksi aurinkopaneelin teho heikentyy iän myötä. Hintakehitys on ollut vuosien varrella tasaisesti halpenevaan suuntaan [3, s. 189].

Aurinkokennot ovat tyypillisesti piitä, johon on lisätty pieniä määriä lisäaineita [9, s. 33]. Aurinkopaneeli sisältää useita sarjaan kytkettyjä kennoja. Aurinkopaneelin kenno muuntaa aurinkosäteilyn sähköenergiaksi parhaiten kohtisuorassa kulmassa aurinkoon nähden, mikä on hyvä huomioida asennuspaikassa. [9, s. 44, 93.] Markkinoita hallitsevat yksikiteiset ja monikiteiset paneelit. Monikidepaneelit ovat yleensä edullisempia mutta heikompia hyötysuhteeltaan. Monikidepaneelin osittainen varjostuminen ei heikennä tuottoa yhtä paljon kuin yksikiteisen. Yksikidepaneeli on hyötysuhteeltaan parempi. [9, s. 43–44.]

Rakennuksen katolle asennettavat aurinkopaneelit ovat tyypillisesti piikkitehoaan 250–530 W, joka ilmoitetaan W_p . Piikkiteholla tarkoitetaan paneelin optimaalisessa tilanteessa tuottamaa sähkötehoa. Tyypillisin omakotitaloille suunnattu järjestelmä on verkkoon liitetty järjestelmä, missä aurinkopaneelit on asennettu rakennuksen katolle [9, s. 83]. Aurinkoa seuraavalla järjestelmällä aurinkosta saadaan maksimaalinen hyöty. Tämän tyyppinen seurantalaitteisto asennetaan yleensä maahan. [3, s. 163–167.] Haittapuolena on asennuksen vikaantumismahdollisuus sekä tilaa vievä tuulikuormat kestävä rakennelma. Kiinteästi asennetuilla aurinkopaneeleilla energian saanti on vähäisempää, mutta asennus on monesti edullisempi, esteettinen ja vähemmän herkkä vikaantumiselle.

Aurinkopaneeleita on järjestelmän koosta riippuen muutamista jopa useisiin kymmeneen. Järjestelmää suunniteltaessa aurinkopaneelin soveltuvuus on tarkistettava sähkötekniisten ominaisuuksien osalta ja erityisesti vaihtosuuntaajan jännite- ja virtaraja-arvojen on sovittava yhteen. Aurinkopaneelien teknisistä tiedoista selviää järjestelmän suunnittelua varten useita seikkoja. Teknisistä tiedoista tärkeimmät ovat avoin jännite V_{oc} , sarjaan kytkettyjen paneelien

maksimijännite, ylivirtasuojaus, lämpötilan vaikutus $V/1$ °C, oikosulkuvirta I_{sc} ja maksimivirta I_{mp} . Teknisistä tiedoista selviää myös, kuinka paneelin teho heikentyy iän myötä, mikä tyypillisesti on alle prosentin luokkaa per vuosi. Aurinkopaneelin liitin on vakiintunut MC4-tyyppiseksi, joka kestää korkean tasasähköjännitteen sekä vaativat sääolosuhteet [9, s. 45].

Asennuksen kannalta teknisistä tiedoista selviää paneelin fyysiset mitat ja kiinnityspisteet. Aurinkopaneelit ovat kohtalaisen suurikokoisia, ja joissain tapauksissa sijoituspaikka saattaa rajoittaa paneelien määrän. Asennuspaikka vaikuttaa niin ikään aurinkopaneelin tehontuottoon. Asennuskulman ja ilmansuunnan vaikutus on hyvä tarkistaa esimerkiksi EU:n Joint Research Centerin PVGIS-laskentatyökalulla [2]. Laskentatyökalun avulla voidaan arvioida paneelin todennukaisempi teho ja saada hyvä käsitys arvioidusta sähkön tuotannosta.

Vaihtosuuntaajan yhteensovittamisen sekä johdinmitoituksen kannalta tärkeimmät asiat ovat muun muassa virta, jännite ja lämpötilan vaikutus. Sarjaan kytkettävien aurinkopaneelien määrä määräytyy pienimmän arvon mukaan joko vaihtosuuntaajan avoimen jännitteen maksimista tai aurinkopaneelin sarjaan kytkettyjen paneelien maksimijännitteestä. Vaihtosuuntaajan avoimen jännitteen maksimia ei voi vertailla suoraan aurinkopaneelin ilmoitettuun avoimeen jännitteeseen. Aurinkopaneelit toimivat viileänä paremmin, ja siksi lämpötilan vaikutus on huomioitava. Avoimen jännitteen maksimi on laskettava paneelin tiedoissa esitetyn lämpötilan vaikutuksen V_{oc} kanssa ja pohdittava esimerkiksi alukevään voimakasta auringonpaistetta viileällä kelillä [11, s. 67].

3.3 Akut aurinkosähkövoimalan rinnalle

Akun käyttö tyypillisessä sähköverkkoon liitettyssä aurinkosähkövoimalassa on toistaiseksi harvinainen korkean hinnan ja rajallisen käyttöikänsä vuoksi. Mutta esimerkiksi varavoimakäytössä se on hyvin perusteltu ratkaisu. [3, s. 136, 156, 168.] Uusia akkuteknologioita kehitetään jatkuvasti etenkin liikenteen sähköistymisen myötä. Tällä hetkellä markkinoilla olevat yleisimmät akkutyypit ovat lyijy- ja litiumakut. Molemmista on useita kemiallisia tai valmistusteknisiä variaatioita, joista toiset soveltuvat ominaisuuksiltaan paremmin

aurinkosähkövoimalakäyttöön [9, s. 53–55]. Aurinkosähköjärjestelmään liitettävän akuston suuret virrat voivat aiheuttaa palovaaran, minkä vuoksi ylivirtasuojaukseen sekä vikavirtasuojaukseen liittyvät seikat on huomioitava [3, s. 178].

Akkujen ikääntyminen, jännite, lataus- ja purkaussyklien määrät, purkaussyvyys, jatkuvan tehon anti ja akkutilan vaatimukset ovat keskeisimmät akustoon liittyvät asiat. Kapasiteetin mitoituksessa purkaussyvyys eli todellinen kilowattituntien määrä on näistä tärkein. Akkujen mitoituksen pohjana voidaan käyttää esimerkiksi aurinkosähkövoimalan kokoa. Tällä menetelmällä esimerkiksi Saksassa optimaalisena suhteena pidetään 0,5 kWh/kW_p [3, s. 153]. Sähköauton latauksen näkökulmasta tämä ei kuitenkaan ole paras menetelmä määrittellä akuston kokoa. Työn tutkimusosassa voidaan havaita, että akkujen mitoituksessa on otettava huomioon laajempi kokonaisuus ja aurinkosähkövoimalaan liitetyt akut ovat monessa tapauksessa hyödyksi.

Asennuksessa on otettava huomioon akuston vika- ja ylivirtasuojaus, akkutilan vaatimukset sekä kaapeloinnin mitoitukset. Lataussäätimen ja vaihtosuuntaajan sijoituksen tulisi olla mahdollisimman lähellä akkuja, sillä on suositeltavaa käyttää lyhyitä ja paksuja johtoja akun ja laitteiden välillä [9, s. 74, 78].

4 Sähköauton lataus

4.1 Tyypilliset lataustavat

Sähköauton lataukseen on useita vaihtoehtoja, jotka jaetaan tyypillisesti hidaslataukseen, peruslataukseen ja tehollataukseen. Suositeltavin sähköajoneuvojen lataustapa on lataustapa 3, missä ajoneuvoa syötetään tyyppin 2 sähköautopistorasiasta. [12.]

Hidaslatauksella tarkoitetaan lataustapaa 2 (mode 2), joka on tilapäislataukseen tarkoitettu, esimerkiksi matkalaturi. Latausjohdossa on ohjaus- ja suojalaiteyksikkö ja pitkäkestoisessa latauksessa latausvirta rajoitetaan 8 A:iin. Latausteho on 1,4–1,8 kW. [12.]

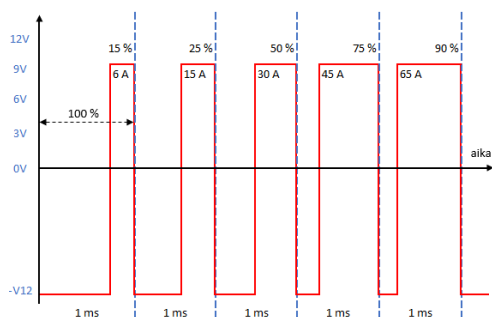
Lataustapa 4 (mode 4) on tehollataus, jossa ulkopuolinen laturi syöttää ajoneuvoon tasasähköä [13, s. 200]. Lataustapaa 4 on tarjolla esimerkiksi julkisilla paikoilla, kuten isojen kauppakeskusten parkkialueella tai huoltoasemilla. Latausteho on tyypillisesti 50–350 kW [12].

Kotikäytössä on tyypillisesti peruslataus, lataustapa 3 (mode 3). Kotilatausasema, joka kiinnitetään kiinteästi esimerkiksi seinälle, tarjoaa turvallisen tavan kytkeä auton laturi sähköverkkoon. Latausasema ilmoittaa kulkuneuvon latausjärjestelmälle käytössä olevan maksimilatausvirran Control Pilot -johdinta pitkin. Latausaseman kontaktorin kautta sähköverkon jännite kytkeytyy latausjohdinta pitkin auton laturille. Lataustapa 3:lla voidaan saavuttaa enintään 43 kW:n latausteho, mutta latausteho riippuu auton sisäisestä laturista. [12; 14.] Esimerkiksi VW ID Pure -malliston latausnopeus on maksimissaan 7,2 kW (2 × 16 A) ja muilla ID-malleilla maksimissaan 11 kW (3 × 16 A) [14].

Tyypillisissä kotilatausasemissa latausvirta on valittavissa. Pienin valittava voi olla esimerkiksi 10 A. Latauskaapelin maksimivirta on tyypillisesti joko 16 A tai 32 A. Maksimilatausvirta voi olla korkeintaan niin suuri, mitä lataustavalle on määritetty. Tämän jälkeen maksimilatausvirta on korkeintaan asennuskohteen sähköverkon kapasiteetin sallima, joka voidaan laskea sähköliittymän

pääsulakkeen ja kuormituksen erotuksella. Latausaseman asennuspisteessä maksimilatausvirta määräytyy ryhmäkohtaisen johdonsuojakatkaisijan tai sulakkeen, syöttökaapelin ja asennusolosuhteiden, latausaseman tai latauskaapelin suurimman sallitun virran mukaan. Viimein latausteho saattaa rajoittua autossa sijaitsevan laturin maksimitehoon. [15.]

Dynaamisessa latauksessa latausasema muuttaa maksimilatausvirran signaalia esimerkiksi sähköliittymän käyttöasteen mukaan. Kuvassa 6 on esitetty, kuinka kulkuneuvon laturille lähetetään kanttiaaltoista signaalia, joka tulkitaan syöttölaitteen antamaksi maksimivirraksi. Dynaaminen lataus edellyttää tehon mittamista, jonka perusteella latausasema muuttaa lataustehon signaalia.



Kuva 6. Kantiaaltosignaali kertoo käytettävissä olevan latausvirran maksimin [16].

Sähköalaa koskevien vaatimusten mukainen latausaseman asennus on turvallinen. Latausaseman asennus ei kuitenkaan poikkea merkittävästi kiinteiden sähkölaitteiden asennuksesta, mutta esimerkiksi kiinteistöjen sähköverkkojen erityiset asennusvaatimukset on huomioitava. [12; 13.] Suuremmissa kohteissa sähköjärjestelmän mitoitukseen ja latauspisteiden suunnitteluun on syytä panostaa.

Markkinoilla on aurinkosähkövoimaloihin erikoistuneita valmistajia, jotka tarjoavat kattavasti aurinkosähköön liittyviä tuotteita. Esimerkiksi SolarEdge HD Wave Solar Inverter -laitteessa on yhdistetty vaihtosuuntaaja sekä sähköauton latausasema yhdeksi laitteeksi. Asennettavien laitteiden määrä pienenee ja kytkentöjä on siten vähemmän. Laitteesta mainostetaan, että se voidaan asettaa lataamaan sähköautoa pelkästään aurinkosähköllä. SolarEdge tarjoaa myös erillisen

sähköauton latausaseman. Jos latausasema on liitetty SolarEdgen aurinkosähkövoimalaan, voidaan sähköautoa ladata niin ikään aurinkosähkövoimalan tuottamalla ylimääräisellä sähköenergialla. [17.]

4.2 Latausajat ja akuston käyttöikä

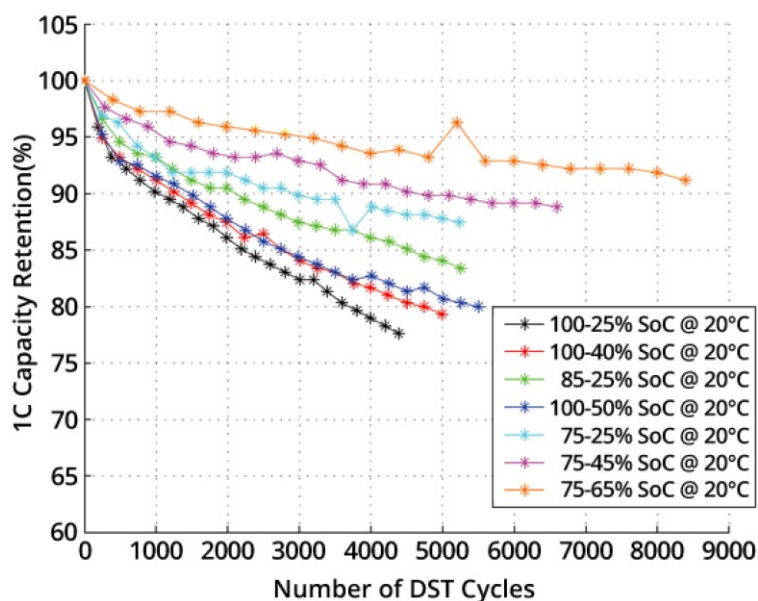
Akuston käyttöikä riippuu monesta tekijästä. Litiumakkujen sähkökemiallinen reaktio heikentää akun varauskapasiteettia ja voi olla lopulta vaarallinen käyttäjä. Reaktio on käynnissä akun valmistushetkestä lähtien, mutta sitä voi myös nopeuttaa monella eri tavalla. Yksi vaikuttava tekijä on se, kuinka akkua ladataan. Lähtökohtaisesti litiumakkujen täyteen lataus ja syväpurkaus ovat akulle huonoksi. Akut kestävät pidempään, kun niitä käytetään nimelliskapasiteettia pienemmällä alueella ja latausteho pidetään alhaisena. Alhainen latausteho vaikuttaa luonnollisesti myös latausaikaan. [18.]

Sähköauton latausaikaan vaikuttavat merkittävästi akuston alkuvaraustila, ladattavan tehon määrä, latausteho ja litiumakustossa myös lämpötila [19; 15]. Alkuvaraustilan merkitys korostuu etenkin teholatauksessa, jossa lataustehoa vähennetään varaustilan lähestyessä täyttä [15].

Kotilatausasemissa minimivirta voidaan tyypillisesti valita joko 10 A (2,3 kW) tai 8 A (1,8 kW) yhdellä vaiheella. Kantomatkaa esimerkiksi VW ID.3 -sähköautolle 2,3 kW:n latausteholla saadaan noin 12 km/h [14]. Kotilatausaseman mallista riippuen maksimivirtaraja on mahdollista asettaa ampeereina 8, 10, 13, 16 (1-vaiheinen), tai 8, 10, 13, 16 (3-vaiheinen), mutta ei kaikissa [20]. 1 × 16 A:n (3,6 kW) virralla kantomatkaa latautuu noin 19 km/h. Jos latausteho on 7,2 kW, eli 3 × 16 A, kantomatkaa latautuu noin 38 km/h. [14.] Mikäli lataus ajoittuu illan ja yön ajaksi esimerkiksi 10 tunnin ajalle, saadaan hitaimmalla teholla kantomatkaa 96 km, joka on monelle riittävä. 3,6 kW:n latausteholla 10 tunnin aikana kantomatkaa kertyy noin 190 km.

Akun käyttöikää esitetään usein lataussykliä määrällä. 2016 tehdyssä tutkimuksessa [18] ilmenee, että jos akkua käytetään 25–75 %:n nimelliskapasiteettialueella, akku kestää kohtuullisen monta lataussykliä (ks. kuva 7). Kuvan

mukaan akku heikkenee vähiten, kun sitä käytetään 65–75 %:n nimelliskapasiteetti-alueella. [18.] SoC kertoo jäljellä olevan akun kapasiteetin prosenttilukuna alkuperäiseen kapasiteettiin nähden. Akkukapasiteetin heikentymiseen vaikuttaa latausyhtymien määrän lisäksi myös akun ikääntyminen [15]. Akkukemiat vaihtelevat kuitenkin suuresti, ja siksi nämä raja-arvot ovat harkinnanvaraisesti sovellettavissa. Työssä näiden oletetaan olevan yleispäteviä.



Kuva 7. Akkukapasiteetin heikentyminen [18].

Sähköautovalmistajat huomioivat akkukapasiteetin laskua akunhallintajärjestelmällä. Järjestelmä antaa aluksi käyttöön pienemmän osan nimelliskapasiteetti-alueesta, ja kun akku alkaa menettämään kapasiteettiaan, sitä kompensoidaan vapauttamalla suurempi osa käyttöön. Lopulta koko alue on käytössä, eikä sitä voida enää kompensoida. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että akunhallintajärjestelmä ei rajoita lataus- ja purkusyvyyttä, mikä osaltaan kiihdyttää akun heikkenemistä. [18.]

Lämpötila-alue litiumakuilla on moniin sääolosuhteisiin sopiva, mutta käyttölämpötila vaihtelee akkukemiasta riippuen. Yleisesti ottaen lämpötilan tulisi olla 0–45 °C, että akku toimii parhaiten. Korkea lämpötila on huonoksi. Jos akku on kylmä, lataustehon pitää olla selkeästi pienempi, ettei akku vaurioidu. [19.] Monet sähköautovalmistajat käyttävät akkujen lämmitystä kylmällä, mikä lisää

sähkön kulutusta. Talvisin lataus suoraan ajon päätteeksi vähentää ylimääräisen lämmityksen tarvetta, mikäli sähköauto jää kylmän armoille. Akkujen lämpötilaa pyritään pitämään sopivana myös kuumalla. Monissa sähköautoissa on jonkinlainen jäähdytysratkaisu. Sähköautoissa akkuja valvoo BMS, battery management system, joka tarkkailee muun muassa akuston lämpötilaa. BMS pitää huolen siitä, että akkuja ladataan sopivalla teholla akuston lämpötilaan nähden. [21.] Kylmällä ilmalla lämmin autosuoja on eduksi.

4.3 Sähköauton kulutus

Lähes kaikki autovalmistajat ilmoittavat automallin kulutuksen WLTP-mittaustavalla toteutettuna. Todellinen kulutus on vähintäänkin haasteellinen käsite, mutta WLTP on hyvä vertailuluku, sillä se perustuu maailmanlaajuisesti yhtenäistettyyn testimenetelmään. Internetissä on jonkun verran kulutukseen liittyviä artikkeleja ja niiden pohjalta etenkin kylmät olosuhteet vaikuttavat olevan suuri kulutusta lisäävä tekijä. Ajoradalla oleva loska lisää myös kulutusta. [15; 19; 21.]

Sähköauton kulutukseen vaikuttavat pääsääntöisesti ajoneuvon tekniset ominaisuudet, ajotavat, ajonopeudet ja lämpötilat. Kylmällä säällä akusto ei suoriudu yhtä hyvin kuin lämpimillä keleillä. Etenkin kovat pakkaset voivat vaikuttaa WLTP-mittauksilla ilmoitettuun kantomatkaan jopa 20–30 % [15]. EV-databasen verkkosivuille [22] on listattu useiden sähköautojen kulutus- ja kantomatkatietoja.

Esimerkiksi VW ID.3 -henkilöautolle on valmistaja ilmoittanut kulutukseksi WLTP-mittauksen mukaan 15,5 kWh/100 km, joka on auton kokoluokalle melko tavanomainen. Mutta koska kulutus riippuu niin monesta asiasta, on VW korva-merkinnyt tiedon ennakoivasti vastuuvapautuslausekkeella. [23.] Teslan Model X:lle ei ole ilmoitettu virallista WLTP-kulutusta, mutta sen arvioidaan olevan 20–26 kWh/100 km [24]. Auto on kooltaan selkeästi isompi kuin VW ID.3. EV-database -verkkosivusto [22] arvioi VW ID.3 -mallin todellisen kulutuksen olevan 16,6 kWh/100 km ja Tesla Model X Plaidin 20,9 kWh/100 km.

5 Tutkimuksen toteutus

Tutkimusta varten luotiin Excel-pohjainen simulointityökalu, joka simuloi aurinkosähkövoimalan tuotantoa ja sähköautoilijan ajorutiineja yhden vuoden ajalle tunnin tarkkuudella. Simulointi pohjautui aurinkosähkötuotannon osalta EU:n Joint Research Centerin PVGIS-laskentatyökaluun [2]. Tutkimusta rajattiin siten, että kohteen sijainti ja aurinkopaneelien asennuskulma olivat kiinteästi määritellyjä. Muuttujina oli ajomatkat, latausteho sekä aurinkosähkövoimalan akusto, nimellisteho ja ilmansuunta. Sähköauton kulutus laskettiin lämpötila- ja ajonopeuskertoimilla. Muuttujien vaikutusta analysoitiin Excel-kuvaajien avulla. Kaikki kuvat luvuissa 5.3 ja 5.4 ovat Excel-simulointityökalusta.

PVGIS-laskentatyökalusta ladattiin aurinkosähkövoimalan tuottolaskelmat vuosille 2011–2016 eri ilmansuuntiin suunnatuille aurinkopaneeleille ja aurinkosähkövoimalan sijainti valittiin Sipoosta. Tiedoista poimittiin keskiarvo yhden vuoden mittaiseksi. PVGIS-laskentatyökalu sisältää myös lämpötilatiedot. Lämpötiloja vertailtiin Ilmatieteen laitoksen Helsinki-Vantaan lentokentän lämpötilatilaan, joka on kerätty vuosilta 1991–2020 [25]. Laskennassa päädyttiin käyttämään PVGIS-laskentatyökalun lämpötiloja vuodelta 2013, jolla saatiin keskiarvojen sijaan suuremmat tuntikohtaiset lämpötilavaihtelut.

Sähköajoneuvon tarkkoja yksityiskohtaisia kulutustietoja ei ollut saatavilla, ja siitä syystä kulutuskertoimia sovellettiin kirjoitettujen julkaisujen pohjalta [15; 21; 24]. Simuloinnissa ei otettu huomioon akkujen lämpötilaa kylmällä säällä tai kuinka akkujen lämpiäminen vaikuttaa kulutukseen, koska siihen voi vaikuttaa esimerkiksi, missä sähköautoa säilytetään.

Aurinkosähkövoimala mitoitetaan yleensä siten, että tuotanto saadaan kulutettua pääsääntöisesti omiin tarpeisiin, koska sähkön myynnistä ei saada hyvää hintaa [3, s. 162]. Tässä työssä huomio keskittyi pelkästään sähköauton lataukseen, eikä tyypillisen mitoituksen mukaista pohjakulutusta huomioitu työssä olleena.

5.1 Tilastot ja raja-arvot

Aut.fi-sivuston vuoden 2018 tilaston [26] mukaan henkilöautojen keskimääräinen ajosuorite oli 13 794 km, ja Liikenneviraston vuoden 2016 henkilöliikennetutkimuksen raportissa [27] ilmeni, että henkilöautolla oli kuljettu vuorokauden aikana keskimäärin 31,1 kilometriä. Valtionvarainministeriön 2020 raportin [28] mukaan kodin ja työpaikan välinen matka oli keskimäärin yli 16 km vuonna 2016.

Simuloinnissa käytetty perusviikkoprofiili määriteltiin tilastojen välille, 12 480 km vuotta kohden. Tämä vastaa ajomäärältään 40 km jokaista arkipäivää kohden ja 40 km viikonlopulle yhteensä.

Työpäivä rajattiin päivätyötä tekevän arkeen, joka sijoittuu kellonajalle 7–18. Vuorotyötä tekevien on luettava tuloksia soveltuvien osin.

Lomia tai arkipyhiä ei huomioitu laskennassa, koska kyseisillä ajankohdilla autoilun määrä vaihtelee laidasta laitaan. Joissain tapauksissa aurinkosähköä voisi hyödyntää jopa arkea paremmin, kun taas esimerkiksi pitkillä matkoilla joutuneen turvautumaan pikalautaukseen.

Talven nopeusrajoituksia ei huomioitu laskennassa. Laskennassa käytetyt nopeuskertoimet oli kiinteästi määritelty. Laskennassa huomioitiin kesä- ja talvi-aika.

Lämpötiloissa käytettiin PVGIS-laskelman vuoden 2013 antamaa lämpötilaa. Lämpötilaa verrattiin Ilmatieteen laitoksen lämpötilatilastoon [25] Helsinki-Vantaan lentokentältä, ja siitä kävi ilmi kuukausikohtainen kuuden tunnin jaksojen keskiarvo. Vertailussa PVGIS-laskelman lämpötilan keskiarvo oli 0,2 °C Ilmatieteen laitoksen lämpötilaa lämpimämpi.

Simuloinnissa sähköauton akun varaustaso liikkui kulutuksesta riippuen pääsääntöisesti 30–75 %. Simuloinnissa sähköauton lataus suoritettiin viikkoaikataulun mukaisesti silloin, kun sähköauton akun varaustaso alitti 60 %:n rajan. Lataus pysähtyi viimeistään, kun akun varaustaso saavutti 75 %. Raja-arvot

sovellettiin litiumakkujen kapasiteetin heikentymiseen perustuvien testitulosten perusteella, joka käsiteltiin luvussa 4.2.

Simuloinnissa aurinkosähkövoimalaan liitetyn akun koolla tarkoitetaan tässä työssä käyttökapasiteettia, eli todellista kilowattituntien määrää. Käyttökapasiteetti riippuu akkukemialle soveltuvasta purkaussyvyydestä ja purkausvirrasta [9, s. 64].

Työssä laskettiin muun muassa aurinkosähkövoimalan tuotantoa ja sähköauton kulutusta vuoden jokaista tuntia kohti. Kalenteriteknisien syitten takia työssä vuosi rajattiin koostumaan 52 täydestä viikosta.

Työssä käsitellyt Spot-hinnat, hintojen kuvaajat ja niillä tehdyt laskennat perustuvat Tilastokeskuksen hintoihin [6]. Työssä ei varsinaisesti käsitelty hintoja, mutta tilastolla pyrittiin näyttämään Spot-hintojen tyypillistä hintavaihtelua.

5.2 Simuloinnin perusjärjestelmä

Perusjärjestelmällä tässä työssä tarkoitetaan lähtöarvoja vertailua varten. Tätä käytetään soveltuvien osin pohjana, kun työssä esitetään erityyppisten muuttujien vaikutuksia. Perusjärjestelmä koostuu seuraavista lähtöarvoista:

- aurinkosähkövoimalan koko 6 kW_p
- aurinkopaneelien kallistuskulma 27°
- aurinkopaneelien ilmansuunta etelään
- verkkoon liitetyn aurinkosähkövoimalan sähkön myyntihinta 1/3
- aurinkosähkövoimala akulla, hyötysuhde 90 %
- autovaihtoehto nro.1
- sähköauton latausteho 2,3 kW.

5.3 Sähköauton kulutusmallit

Työssä kulutusta pyrittiin arvioimaan valmistajien ilmoittamien kulutustietojen sekä käytännön testeistä kirjoitettujen artikkelien avulla [15; 21; 24]. Kuvassa 8

on simulointia varten luodut kuvitteelliset automallit ja niiden kulutukseen vaikuttavat kertoimet. Kulutuskertoimissa mallinnuksen pohjana käytetyille autoille todellisia kertoimia ei ole saatavilla, ja siksi taulukon kertoimet ovat suuntaa antavat. Kulutuskertoimet eivät poikkea merkittävästi toisistaan, koska niillä korjataan keskikulutusta.

Simuloinnissa päädyttiin käyttämään vain autovaihtoehtoa 1. Tämä rajausta tehtiin siitä syystä, että simulaation tuloksia tuli liian paljon kaikkien muuttujien kanssa.

Autojen tiedot			
	Vaihtoehto		
	1	2	3
Kulutus [kWh/100 km]	16,6	17,1	26,8
Akkukapasiteetti [kWh]	58	77	75
Mallinnus perustuu	Volkswagen-ID3-Pro-Performance	CUPRA-Born-170-kW---77-kWh	Toyota-PROACE-Shuttle-L-75-kWh

Nopeuden kulutuskertoimet			
km/h	Vaihtoehto		
	1	2	3
20	0,6	0,6	0,7
30	0,65	0,7	0,8
40	0,7	0,8	0,9
50	0,75	0,9	0,95
60	0,8	0,95	1
70	0,9	1	1,05
80	1	1,1	1,1
90	1,1	1,18	1,18
100	1,2	1,25	1,25
110	1,25	1,3	1,3
120	1,3	1,4	1,4

Lämpötilan kulutuskertoimet			
°C	Vaihtoehto		
	1	2	3
-30	2,45	2,45	2,45
-24	2,1	2,1	2,1
-18	1,73	1,73	1,73
-12	1,46	1,46	1,46
-6	1,29	1,29	1,29
0	1,18	1,18	1,18
6	1,12	1,12	1,12
12	1,06	1,06	1,06
20	1	1	1
25	0,98	0,98	0,98
30	0,95	0,95	0,95

Kuva 8. Simulointityökalussa olevien ajoneuvomallien teoreettiset kertoimet.

Sähköauton ajoakun lataushäviöitä ei ole erikseen määritelty. Lataushäviöiden oletetaan sisältyvän sähköauton kokonaiskulutukseen.

5.4 Päivärutiinien simulointi viikkoprofiilien avulla

Simulaatiossa käytetyt niin sanotut viikkoprofiilit olivat keskeinen osa työn tutkimukselle. Viikkoprofiilit ovat päivärutiinien malleja ja koostuvat ajomatkasta, ajonopeuksista sekä viikkoaikataulusta. Ajomatalla on suurin merkitys sähköauton sähköenergian tarpeeseen. Sähköauton kulutus riippuu myös matkanopeudesta ja siksi todenmukaisuutta haettiin arvioidulla nopeusvaihtelulla. Viikkoaikataulun tarkoituksena oli huomioida päiväkohtaiset rutiinit. Tämän avulla mallinnettiin arkista käyttäytymistä, kuten työmatkoja, viikonlopulle ajoittuvaa ajamista sekä autoilijalle soveltuvia latausaikoja. Tässä työssä työpäivällä tarkoitetaan klo 7–18 ajalle sijoittuvaa työtä, vaikka esimerkiksi vuorotyötä tekevien työpäivä koostuu useasta eri ajankohdasta. Ihmisten päivärutiinit ovat erilaisia, ja siksi työssä tutkittiin useita viikkoprofiileja. Kuvassa 9 on kaikki simuloidut viikkoprofiilit.

Viikkoprofiilit

PerusAP 7-15
PerusAP 7-15 11-Päivälataus
PerusAP 7-15 1etä
PerusAP 7-15 2etä
PerusAP 7-15 Ainalataus
PerusAP 7-15 Päivälataus
PerusAP 9-17
PerusAP 9-17 Päivälataus
15tkm 7-15
15tkm 7-15 1etä
15tkm 7-15 2etä
15tkm 7-15 Päivälataus
15tkm 9-17
15tkm 9-17 Ainalataus
15tkm 9-17 Päivälataus
21.5tkm 7-15
21.5tkm 7-15 1etä
21.5tkm 7-15 2etä
21.5tkm 7-15 Päivälataus
21.5tkm 9-17 Ainalataus
21.5tkm 9-17 Päivälataus
28tkm 7-15
28tkm 7-15 1etä
28tkm 7-15 2etä
28tkm 7-15 Päivälataus
28tkm 9-17 Ainalataus
28tkm 9-17 Päivälataus

Selitykset:

PerusAP	Aikataulutetut päivärutiinit, ajoa kertyy noin 12 500 km vuodessa. 40 km arkipäivälle.
7-15 tai 9-17	Työpäivän ajankohta. Pientä päiväkohtaista vaihtelua.
Päivälataus	Mahdollisuus ladata työpäivän aikana.
1etä tai 2etä	Työviikkokohtainen etäpäivien määrä. *
Ainalataus	Lataus mahdollista aina kun ei ajeta.
15tkm	Ajoa kertyy noin 15 000 km vuodessa. 50 km arkipäivälle.
21.5tkm	Ajoa kertyy noin 21 500 km vuodessa. 75 km arkipäivälle.
28tkm	Ajoa kertyy noin 28 000 km vuodessa. 100 km arkipäivälle.

*) Etäpäivänä mahdollisuus ajoitettuun lataukseen klo 11 alkaen.
Etäpäivää edeltävänä iltana ei ladata.

Kuva 9. Simulointityökalun viikkoprofiilit. Viikkoprofiilien nimet annettiin Excel-välilehden nimen merkkimäärärajoitteen takia lyhyenä. SI-järjestelmä ei tunne nimessä käytettyä tkm -yksikköä, megametri (Mm) viittaisi oikein.

Vertailun helpottamiseksi kaikilla viikkoprofiileilla pidettiin samat nopeusvaihteluiden painoarvot, sähköauton akun yläraja sekä lataustarpeen raja-arvo.

Sähköauton akun varaustason yläraja asetettiin 75 %:iin ja lataustarveraja 60 %:iin akun kapasiteetista. Ajonopeuksien painoarvoja eri viikonpäiville esitetään kuvassa 10. Ajonopeuksien painoarvoilla laskettiin ajettavan matkan energiakulutus ajoneuvokohtaisen kulutusprofiilin mukaan. Simuloinnissa ei huomioitu talvirajoituksia.

päivä	ajonopeus 60 km/h	ajonopeus 120 km/h
maanantai	60 %	40 %
tiistai	75 %	25 %
keskiviikko	50 %	50 %
torstai	75 %	25 %
perjantai	65 %	35 %
lauantai	90 %	10 %
sunnuntai	80 %	20 %

Kuva 10. Simulointityökalussa olevien ajonopeuksien painoarvot eri viikonpäivinä.

Keskeisimmät tiedot viikkoprofiileista

Lähtökohtana työssä käytettiin perusviikkoprofiilia. Kaikki muut viikkoprofiilit ovat tästä muunneltuja. Kaikki viikkoprofiilit sisältävät ajokilometrit, poissaolot ja ajankohdan, jolloin sähköauton lataus on mahdollinen. Perusviikkoprofiilissa ajomatka määriteltiin tilastojen keskimääräisiä ajomatkoja soveltaen.

Viikkoaikataulun päiväkohtaiset rutiinit jakautuvat karkeasti kahteen osaan, arki ja viikonloppu. Arjen on ajateltu koostuvan kahdeksan tunnin työpäivästä, joka ajoittuu klo 7–18 ja tämän päälle muutamana päivänä muuta menoa. Viikonloppuna autolla ajetaan vähemmän ja poissaoloaika on kestoaltaan lyhyempi. Mahdollisuus sähköauton lataukselle vaihtelee profiilin mukaan. Lataustunteja käytetään sähköauton akun varaustilanteen mukaan.

Viikkoprofiilia tulkitaan siten, että L-kirjaimen kohdalla lataus on mahdollista ja numeron kohdalla ajetaan matkaa kilometreissä. Tyhjän kohdalla ajoneuvon kuitellaan olevan poissa. Tunteja käsitellään siten, että kellonaika tarkoittaa koko tuntia. Esimerkiksi viikkoprofiilissa ”PerusAP 7-15” maanantaina työpäivä alkaa kello 7.00.00 ja päättyy klo 14.59.59.

Perusviikkoprofiili

Perusviikkoprofiilin viikko määriteltiin siten, että työmatka-ajoa kertyi arkipäivinä 40 km ja työaika oli keskimäärin klo 7–15. Viikonloppuna ajettiin yhteensä 40 km. Tässä viikkoprofiilissa ei annettu sähköauton lataukselle mahdollisuutta ajojen välissä. Vuositasolla ajokilometrejä kertyi yhteensä 12 480 km.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina	
L = lataus mahdollista	
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
0	L L L L L L L 20
1	L L L L L L L 20
2	L L L L L L L 20
3	L L L L L L L 20
4	L L L L L L L 20
5	L L L L L L L L L L L L 10
6	L L L L L L L L L L L L 10

PerusAP 7-15

Kuva 11. Simulointityökalussa perusviikkoprofiilin viikkoaikataulu.

Yhdellä etätyöpäivällä

Etätyöskentelyn viikkoprofiilissa keskiviikko vaihdettiin etäpäiväksi. Tiistain iltalataus siirrettiin keskiviikon keskipäivälle alkamaan klo 11.00. Keskiviikkoillalle määriteltiin 20 km:n matka klo 18–22 välille. Tämä vähentää keskiviikon ajoa 20 km perusviikkoprofiiliin verrattuna. Kuvasta 12 nähdään, kuinka latausajan kohtaa on siirretty. Vuositasolla ajokilometrejä kertyi yhteensä 11 440 km.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina	
L = lataus mahdollista	
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
0	L L L L L L L 20
1	L L L L L L L 20
2	L L L L L L L L L L L L 10
3	L L L L L L L 20
4	L L L L L L L 20
5	L L L L L L L L L L L L 10
6	L L L L L L L L L L L L 10

PerusAP 7-15 1etä

Kuva 12. Simulointityökalussa perusviikkoprofiili yhdellä etäpäivällä.

Ajoitetulla päivälatauksella

Ajoitetulla päivälatauksella tutkittiin työpäivän aikaista latausta, jossa optimoidaan aurinkosähkön paras tuottoaika. Perusviikkoprofiilin ajomäärällä keskimääräinen latausaika on noin 4,5 tuntia. Kuva 13 havainnollistaa kuinka päivälataus on ajoitettu alkamaan klo 11.00.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina																									
L = lataus mahdollista																									
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0								20					L	L	L	L	20								
1								20					L	L	L	L	20								
2								20					L	L	L	L	L	20							
3								20					L	L	L	L	20								
4								20					L	L	L	20									
5														10					10						
6														10		10									

PerusAP 7-15 11-Päivälataus

Kuva 13. Simulointityökalussa perusviikkoprofiilin ajoitettu päivälataus hyödyntää keskipäivän auringonpaistetta.

Kaksi tuntia myöhemmin

Työssä tutkittiin, kuinka paljon vaikuttaa työpäivän aloitus kaksi tuntia myöhemmin. Kuvassa 14 nähdään, kuinka arkitapahtumat ovat myöhemmin.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina																									
L = lataus mahdollista																									
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		L	L	L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L
1		L	L	L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L
2		L	L	L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L
3		L	L	L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L
4		L	L	L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L
5		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10				10	L	L	L	L	L	L	L
6		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10		10	L	L	L	L	L	L	L	L	L

PerusAP 9-17

Kuva 14. Simulointityökalun perusviikkoprofiili, missä työpäivä ajoittuu klo 9–17.

Työpäivän aikainen lataus

Työpaikalla lataaminen voi olla monilla ainoa vaihtoehto julkisia latausasemia lukuun ottamatta (kuva 15). Kuten aiemmin on mainittu, tässä työssä työpäivällä tarkoitetaan klo 7–18 ajalle sijoittuvaa työtä. Työpäivän aikaisen latauksen soveltuvuus aurinkosähkövoimalalle löytyy luvussa 6.2.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina																									
L = lataus mahdollista																									
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0								20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:								
1								20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:								
2								20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:								
3								20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:								
4								20:	L	L	L	L	L	L	L	20:									
5														10:					10:						
6														10:			10:								

PerusAP 7-15 Päivälataus

Kuva 15. Simulointityökalun viikkoprofiili, missä sähköautoa ladataan työpaikalla.

Lataus aina mahdollista

Ainalataus-nimisellä viikkoprofiililla oli tarkoitus selvittää, kuinka paljon aurinkoenergiaa voisi hyödyntää, jos lataus olisi aina mahdollista (kuva 16). Tässä oletettiin, että aurinkosähköä hyödynnetään kotilatausaseman lisäksi myös työpaikan latauspisteellä.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina																									
L = lataus mahdollista																									
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L
1		L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L
2		L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L
3		L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L
4		L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	20:	L	L	L	L	L	L	L	L	L
5		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10:	L	L	L	L	10:	L	L	L	L	L	L
6		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10:	L	L	10:	L	L	L	L	L	L	L	L

PerusAP 7-15 Ainalataus

Kuva 16. Simulointityökalun viikkoprofiili. Ladataan aina kun on tarvetta.

Kahdella etätyöpäivällä

Kahden etätyöpäivän viikkoprofiilissa pyrittiin hyödyntämään päivän auringonpaistetta mahdollisimman hyvin (kuva 17). Kahden etätyöpäivän perusviikkoprofiililla vuodessa ajokilometrejä kertyi 10 400 km.

Viikonpäivien ajomatkat eri kellonaikoina																									
L = lataus mahdollista																									
Day of Week 0-6 (0=Maanantai)	klo:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		L	L	L	L	L	L	20									20								
1												L	L	L	L	L	L	L	L	10			10	L	L
2		L	L	L	L	L	L	20									20								
3												L	L	L	L	L	L	L	L	10			10	L	L
4		L	L	L	L	L	L	20								20	L	L	L	L	L	L	L	L	L
5		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10				10	L	L	L	L	L	L
6		L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	10			10	L	L	L	L	L	L	L	L

PerusAP 7-15 2etä

Kuva 17. Simulointityökalun viikkoprofiili. Kaksi etätyöpäivää.

5.5 Aurinkosähkövoimalan häviöt

Työssä huomioitiin aurinkosähkövoimalassa syntyvät häviöt. Aurinkosähkövoimalan häviöt huomioitiin tuottotaulukossa jo niiden luontivaiheessa, jossa häviön osuus oli 14 %. Simuloidessa verkkoon liitettyä aurinkosähkövoimalaa laskettiin sähkön tuotanto 100 %:n hyötysuhteella, eli aiemmin mainitulla 14 %:n häviöllä.

Akkuja hyödyntävässä järjestelmässä vaihtosuuntaajan hyötysuhde on kirjallisuudessa [9, s. 77] arvioitu olevan 90 %:n luokkaa. Akullista aurinkosähkövoimalaa simuloidessa akkujen latauksen osalta hyötysuhteena käytettiin 90 %:a. Toisin sanoen aurinkosähkövoimalan tuotannosta hukattiin ylimääräinen 10 % akuston lataukseen. Sähköauton latausajankohdasta riippuen on mahdollista, että sähköautoa ladataan myös suoraan aurinkosähköllä ilman, että varaus siirretään ensin aurinkosähkövoimalan akustoon. Siinä tapauksessa ylimääräistä 10 %:n häviötä ei muodostu. Aurinkosähkövoimalan kokonaishyötysuhde

paranee aina kun aurinkosähköenergiaa ei tarvitse varastoida ensin voimalan akkuihin ja sen jälkeen siirtää sähköautolle.

6 Tuloksia

Tässä luvussa esitetään simulointien tuloksia. Simulaatioista muodostettu tietokanta sisälsi lopulta kaikkiaan noin 35 000 riviä, joista jokainen rivi edustaa eri muuttujan vaikutusta.

Tuloksien kuvaajissa, joissa on kaksi tasoa X-akselilla, tulkitaan seuraavasti: X-akselin alatasolla 0 on sähköverkkoon liitetty järjestelmä ja 3, 6, 9, 12, 15 ovat akkujen kokoja (kWh). Ylätasolla aurinkosähkövoimalan piikkiteho 0,6...12 (kW_p).

Tulokset simuloitiin perusjärjestelmällä siltä osin, kun oli mahdollista. Perusjärjestelmän tarkempi kuvaus löytyy luvusta 5.2. Vertailua varten simuloitiin eri järjestelmäkoonpanoilla, kun pyrittiin selvittämään akkujen koon ja aurinkosähkövoimalan nimellistehon vaikutukset.

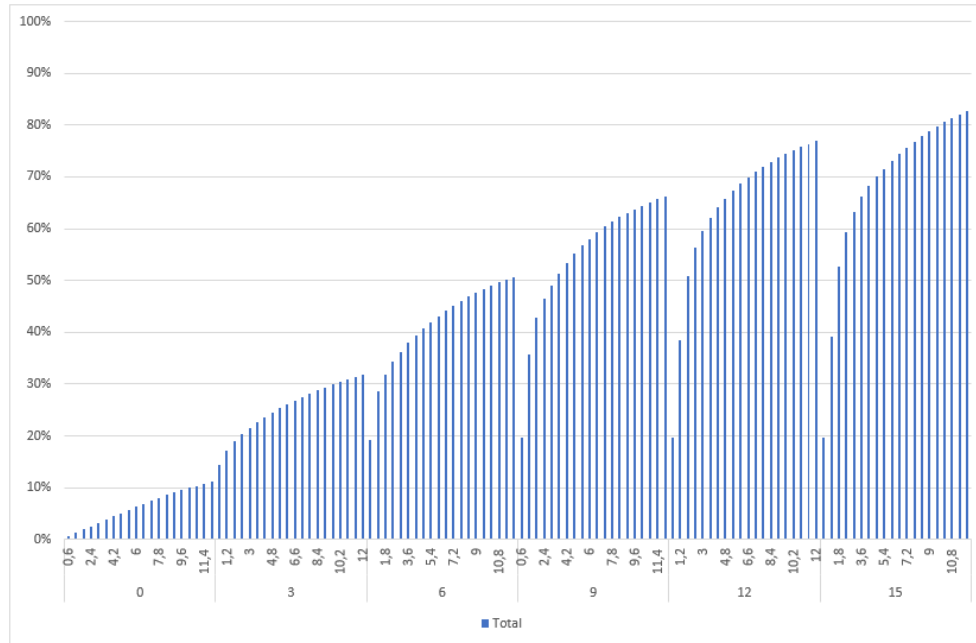
6.1 Aurinkosähkövoimalan nimellistehon vaikutus

Sähköauton latausajankohta vaikuttaa tulokseen, ja siksi aurinkosähkövoimalan nimellistehon vaikutusta tarkastellaan latausajankohdan mukaan. Viikkoprofiilina käytettiin "PerusAP 7-15".

Sähköauton lataus työpäivän ulkopuolella

Sähköverkkoon liitetyllä aurinkosähkövoimalalla nimellistehon kasvatus parantaa sähköautolle hyödynnettävää osuutta vain muutamia prosentteja. Piikkitehon kasvu (kuva 18) näkyy lineaarisesti kasvavana sähköauton lataushyötynä verkkoon liitettyillä aurinkovoimaloilla arvoain 1–12 %. Akkuja hyödyntävissä voimaloissa piikkitehon lisäys kasvattaa sähköauton latausosuutta, mutta rajoittuu akun kapasiteettiin. Esimerkiksi 3 kWh:n akulla 0,6 kWp:n aurinkovoimalalla hyödynnetään 15 %, kun 10 kertaa suuremmalla 6 kWp:n aurinkovoimalalla

vastaava luku on 27 %. Verkkoon liitetyllä suurimmalla 12 kilowattipiikkitehon aurinkovoimalalla saavutetaan noin 12 %:n osuus sähköauton latauksesta, kun taas vastaavat lukemat akkuja hyödyntävissä voimaloissa ovat: 3 kWh = 33 %, 6 kWh = 51 %, 9 kWh = 66 %, 12 kWh = 77 %, 15 kWh = 83 %.

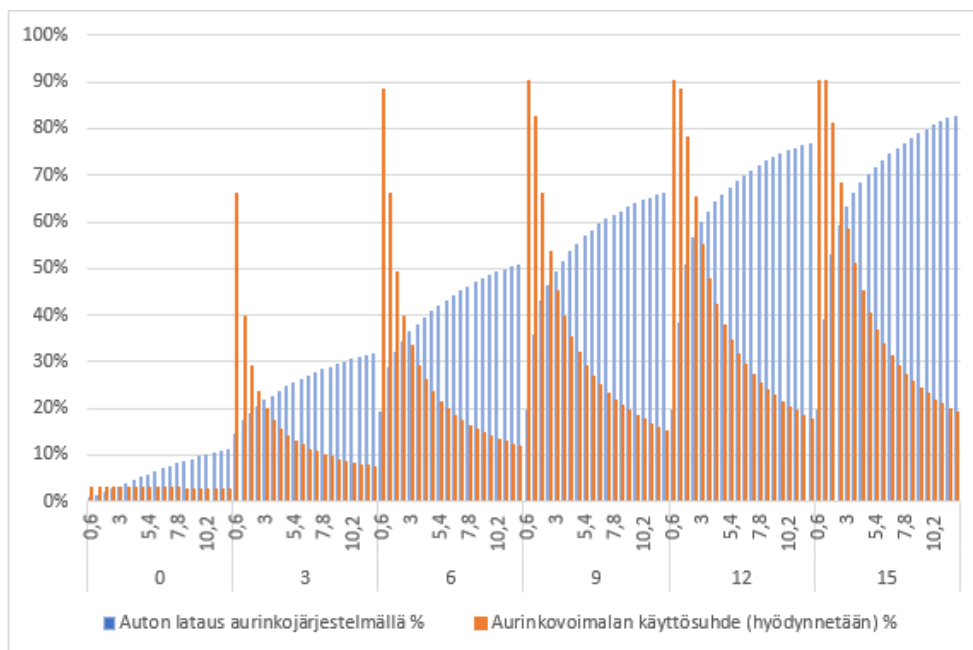


Kuva 18. Sähköauton lataukseen menevä osuus eri kokoisilla aurinkosähkövoimaloilla.

Kuvaan 19 on lisätty aurinkosähkövoimalan käyttösuhde, joka näkyy oranssilla värillä. Kuvaajasta voidaan havaita, että suurta osaa aurinkosähkövoimalalla tuotetusta sähköstä ei voida hyödyntää sähköauton latauksessa. Suoraan sähköverkkoon liitetyssä järjestelmässä hyödynnettävä prosentuaalinen osuus pysyy samana, vaikka aurinkosähkövoimalan kokoa kasvatetaan. Kokoa kasvattamalla voidaan kuitenkin saada sähköauton lataukselle enemmän sähköä, mikä näkyy kuvaajassa sinisellä.

Pienelläkin akulla voidaan hyödyntää aurinkosähkövoimalan tuotantoa huomattavasti, mikäli voimalan koko pidetään maltillisena. Akkuja hyödyntävässä järjestelmässä aurinkosähkövoimalan tehon kasvattaminen parantaa sähköauton latausosuutta, mutta samalla kokonaistuotannosta hyödynnetään suhteessa vähemmän. Tämä johtuu siitä, että aurinkosähkövoimalan tuotanto kasvaa

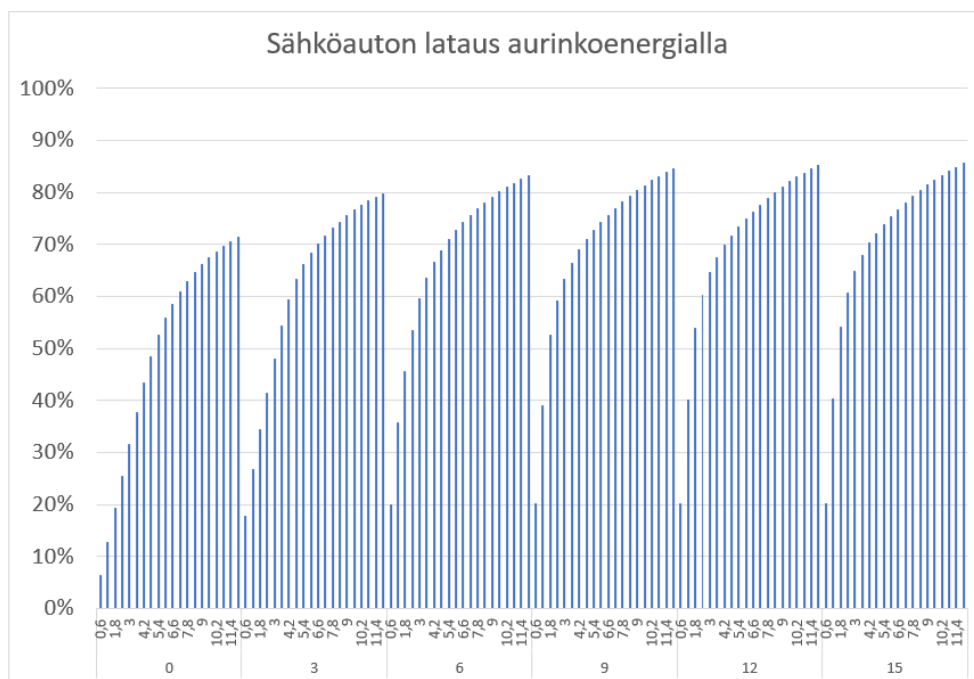
aurinkoisten tuntien suhteessa, kun taas akku kykenee varastoimaan energiaa vain määränsä verran. Akkuja hyödyntävässä järjestelmässä käyttösuhde rajoittuu kuitenkin 90 %:n tietämille lataushäviöiden vuoksi. Tämän viikkoprofiilin simuloinnissa sähköautoa ladattiin 157 kertaa vuoden aikana.



Kuva 19. Sähköauton latauksen osuus ja aurinkosähkövoimalan käyttösuhde.

Sähköauton lataus työpäivän aikana

Jos sähköautoa ladataan työpäivän aikana, sähköverkkoon liitetyllä järjestelmällä pärjätään erittäin hyvin. Kuvassa 20 näkyy, kuinka aurinkosähkövoimalaan liitetyllä 3 kWh:n akulla saadaan noin 10 % parempi tulos. Akun kasvattaminen tätä suuremmaksi ei tuota samassa suhteessa parempaa tulosta. Päivälatauksella saadaan kaikkein parhaimmat tulokset. Parhaimmillaan saavutetaan noin 85 %:n osuus sähköauton koko vuoden lataustarpeista. Tästä voidaan päätellä, että kiinteästi asennetulla kohtuullisen kokoisella aurinkosähkövoimalalla ei voida tuottaa kaikkea sähköauton koko vuoden ajalle tarvitsemaa sähköä. Viikkoprofiilina käytettiin ”PerusAP 7-15 Päivälataus”.

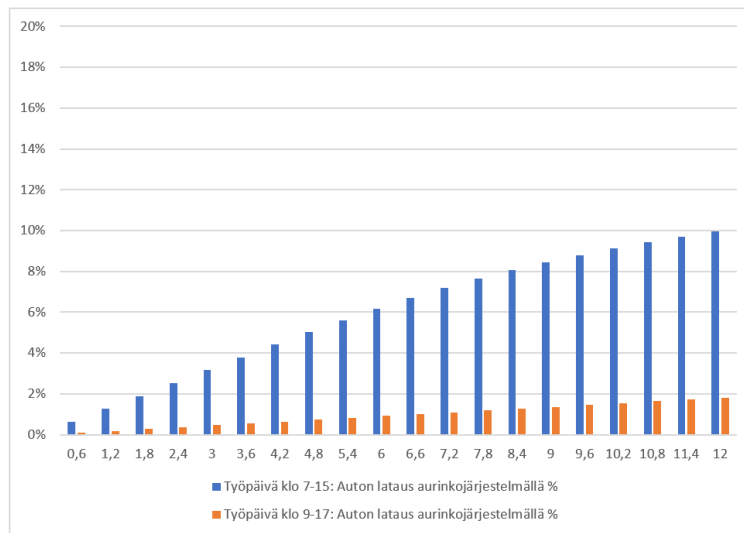


Kuva 20. Päivälataus klo 7–15.

6.2 Latausajankohdan vaikutus

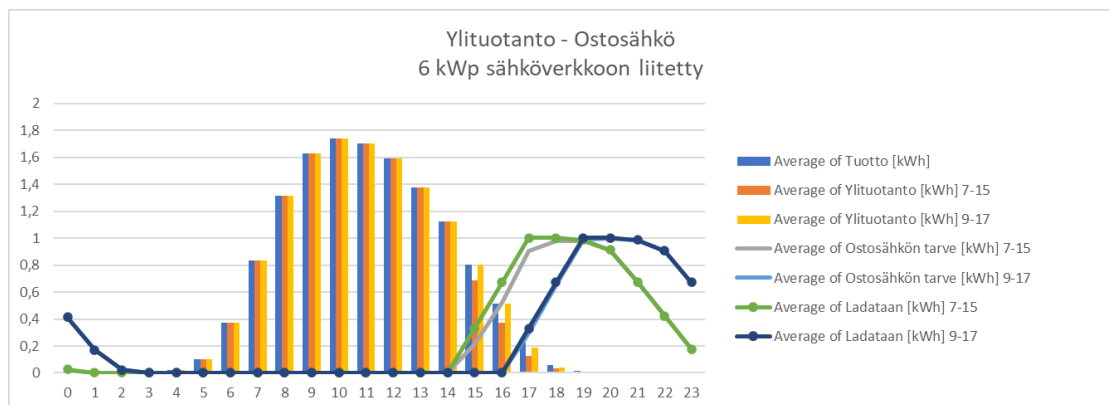
Tämän luvun kuvaajat esitetään perusjärjestelmällä, josta löytyy tarkempi kuvaus luvusta 5.2. Kuvaajat on simuloitu perusviikkoprofiilein, jossa ajoa kertyy 12 480 km vuodessa ja vain sähköauton latausajankohdat vaihtuvat.

Kuvasta 21 nähdään, kuinka kahden tunnin ero vaikuttaa, kun sähköauton lataus aloitetaan työpäivän jälkeen klo 16 tai klo 18 alkaen. Simuloinnin tuloksesta voi päätellä, että sähköauton latauksen aloitusajankohdalla on merkitystä ja kaksi tuntia aikaisemmin aloitetulla latauksella voi hyödyntää aurinkosähköä moninkertaisesti enemmän myöhempää ajankohtaan verrattuna. Toisaalta prosentuaalinen hyöty jää kohtalaisen vähäiseksi jopa suurimmalla simuloidulla aurinkosähkövoimalalla, jossa aurinkosähköä ladattiin autoon parhaimmillaan noin 10 %.



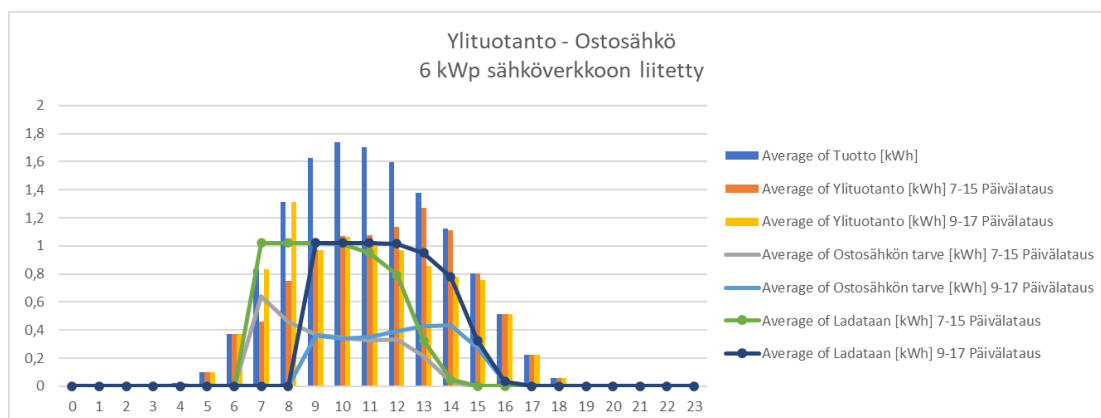
Kuva 21. Lataus työpäivän jälkeen. Erikokoisten sähköverkkoon liitettyjen aurinkosähkövoimaloiden vaikutus. Työpäivän ajankohta eroaa kaksi tuntia.

Latausajankohdan vaikutukset on helpompi arvioida, kun tarkastellaan vuorokausitasolla aurinkosähkövoimalan kokonaistuotantoa, ylituotantoa ja ostosähkön tarvetta (kuva 22). Suoraan verkkoon liitettyllä järjestelmällä on haastavaa kohdistaa tuotanto sähköauton lataukselle, jos latausajankohta on päivätyön jälkeen. Perusviikkoprofiilien klo 7–15 pystyy hyödyntämään aurinkosähköä 6,3 %. Perusviikkoprofiilien klo 9–17 pystyy hyödyntämään aurinkosähköä 0,9 %.



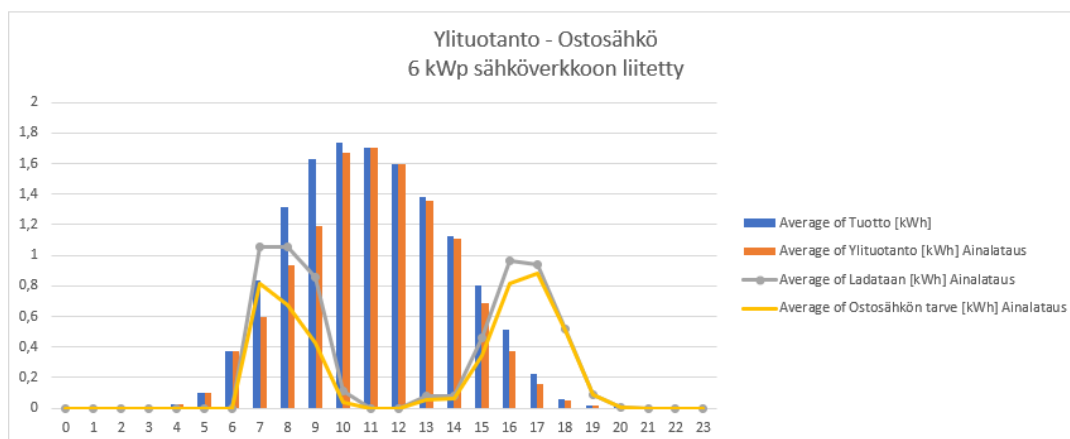
Kuva 22. Latausajankohdan vaikutus.

Jos latausaika on mahdollista työpaikalla, on klo 9–17 vuositasoltaan 1,7 % parempi kuin klo 7–15 (kuva 23). Päivälatauksella klo 7–15 pystytään hyödyntämään aurinkosähköä 55,9 % ja klo 9–17 hyödynnetään 57,6 %.



Kuva 23. Lataus työpäivän aikana.

Jos lataus on aina mahdollinen (kuva 24), on tulos heikompi esimerkiksi pelkäs-tään työpäivän aikaiseen lataukseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että lataus ajoittuu kahdelle ajankohdalle, jossa molemmissa aurinkosähköä on vähemmän saatavilla. Tässä pystytään hyödyntämään aurinkosähköä 34,2 %.

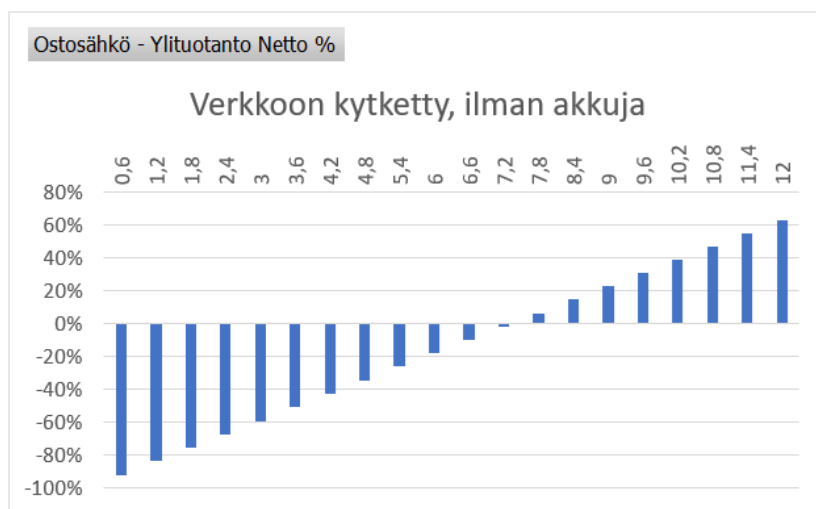


Kuva 24. Aina mahdollinen lataus.

6.3 Talouslaskelma

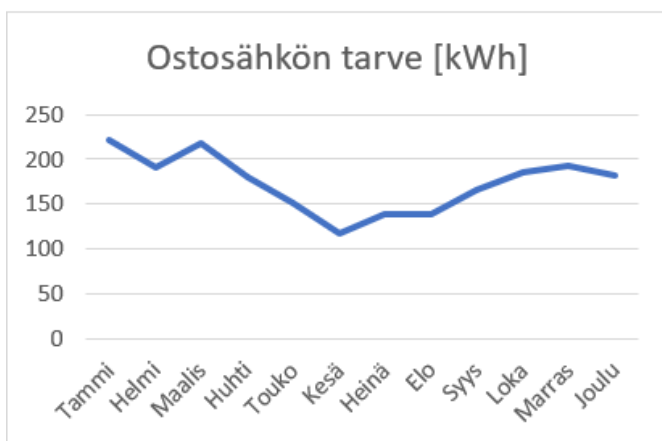
Aurinkosähkövoimalan investointikustannuksia ei työssä tutkittu, mutta tuntinetotuksen myötä sähköenergian oston ja myynnin välistä kamppailua voidaan tarkastella suuntaa antavasti. Simuloinnissa käytettiin Motivan sivuston [5] mukaista 1/3 suhdelukua sähkön myyntihinnalle. Tarkastelussa oletetaan, että suhdeluku ei ole riippuvainen sähkön yleisestä hintatasosta. Tämän luvun kuvaajat on simuloitu perusviikkoprofiililla. Tässä luvussa käsitellyt Spot-hinnat, hintojen kuvaajat ja niillä tehdyt laskennat perustuvat Tilastokeskuksen hintoihin [6].

Kuvassa 25 nähdään kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on aurinkosähkövoimalan nimellisteho (kW_p). Kuvaajan laskelma perustuu siihen, että ostosähkö on kiinteähintainen ja myydystä sähköstä saadaan Spot-hinta. Kun aurinkosähkövoimalan koko on noin $7,2 \text{ kW}_p$, voidaan sähköautoa ladata laskennallisesti oma-varaisesti. Siltä osin, kun sähköauton latauksessa joudutaan turvautumaan ostosähköön, on verkkoon myytävä 2,7 kertaa enemmän sähköä.



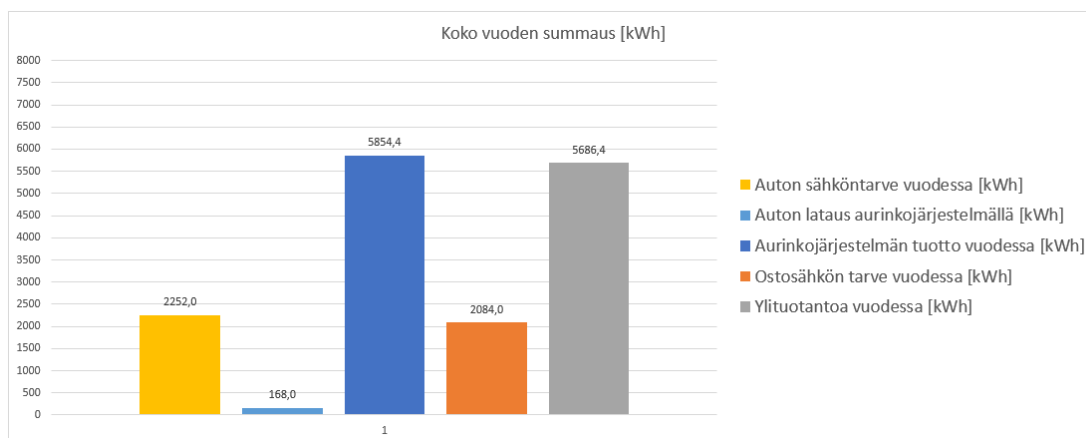
Kuva 25. Tuotannon ja kulutuksen tasapaino rahalla mitattuna. Ostosähkö kiinteähintainen ja myytäessä Spot-hinta suhdeluvulla 1/3 laskettuna.

Lähempi tarkastelu $7,2 \text{ kW}_p$:n aurinkosähkövoimalaan näyttää, kuinka ostosähkön tarve jakautuu eri kuukausille (ks. kuva 26). Kuvasta voidaan havaita, että ostosähkön tarve painottuu talvikuukausille.



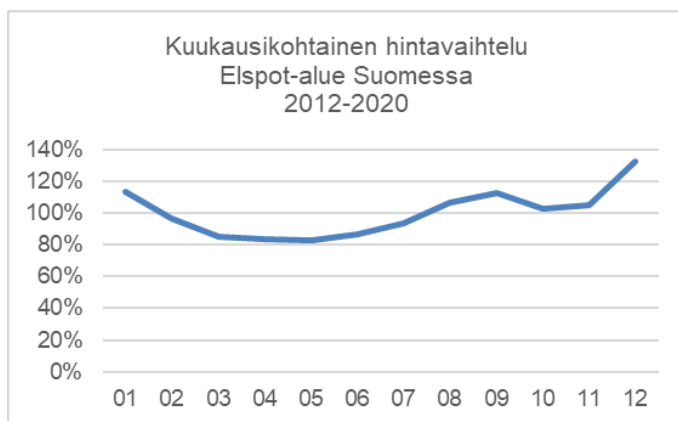
Kuva 26. Ostosähkön tarve eri kuukausina.

Rahallista tasapainoa havitellessa sähkön osto takaisin kasvattaa järjestelmän kokoa huomattavasti ja aurinkoenergian hyödyt jäävät silti pieniksi. Kuvassa 27 nähdään suhdelukuja kokonaisuudesta. Aurinkosähkön tuotannosta 97 % on ylituotantoa ja vain 3 % saadaan hyödynnettyä suoraan sähköauton lataukseen.



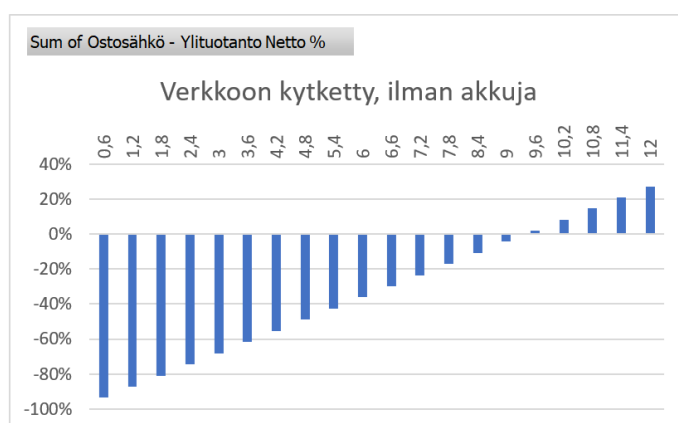
Kuva 27. 7,2 kW_p:n aurinkosähkövoimala on taloudellisesti omavarainen sähköauton latauksessa. Tuotannosta 3 % hyödynnetään suoraan sähköauton lataukseen, joka kattaa 7,5 % sähköauton koko vuoden lataustarpeesta.

Ylemmässä kappaleessa käytettiin kiinteähintaista ostosähköä. Kuukauden keskihinnan tarkkuudella tarkasteltuna voidaan todeta, että kesäaikana pörssisähkön Spot-hinta on eduksi ladatessa sähköautoa ostosähköllä (kuva 28). Mutta samaan aikaan ostosähköä myös tarvitaan vähemmän. Talviaikaan, kun ostosähköä tarvitaan enemmän, nousee myös Spot-hinta.



Kuva 28. Kuukausikohtaisen Spot-hintavaihtelun kuvaaja.

Kun ostosähkössä käytetään Spot-hintaa eli pörssihintaa, on vastaavan järjestelmän oltava 9,6 kW_p:n kokoinen (kuva 29). Aurinkosähkövoimalaa on kasvatettava, koska perusviikkoprofiilin latausajankohta ei ole optimaalinen pörssihinnoilla. Spot-hinta on tilastollisesti päiväaikaan kalliimpi.



Kuva 29. Ostosähkö Spot-hinnalla nostaa aurinkosähkövoimalan kokoa epäedullisen latausajankohdan vuoksi.

Tilastokertoimet ovat suuntaa antavia mutta uskottavia siltä osin, että ne perustuvat sähkömarkkinoiden kysynnän ja tarjonnan suhteeseen. Tutkimukseen ei löytynyt sopivaa tilastoa. Saatavilla oli vuoden mittainen ajanjakso 2022–2023, mutta tämä poikkesi normaalioloista merkittävästi, ja sen vuoksi tilastoa ei käytetty sellaisenaan. Sähkøyhtiön [29] tilastokuvaan verrattuna tuntikohtaisen hintavaihtelun (kuva 30) muoto on säilynyt samankaltaisena.



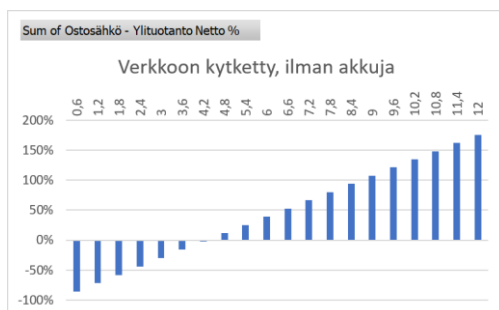
Kuva 30. Vuoden 2022 tuntikohtaisen hintavaihtelun muoto.

Tuntikohtainen hintavaihtelu rauhoittuu viikonlopuksi. Kuvassa 31 on esitetty keskiarvoinen viikko, jossa viikonlopulle ajoittuvat tunnit ovat vain muutamien tuntien ajan keskiarvoa (100 %) korkeammalla.



Kuva 31. Viikon keskimääräinen hintavaihtelu.

Tuntihintojen jakautumisen perusteella sähköauton latausajankohta tulisi ajoittaa keskiyöllä, jolloin laskennallisesti omavaraisen aurinkosähkövoimalan koko olisi 4,2 kW_p (kuva 32). Tällä tavoin autoa ei enää ladata aurinkosähköllä. Kaikki tuotanto myydään verkkoon ja sähköautoa ladataan ostosähköllä.



Kuva 32. Sähköauton lataus ajoitettu alkamaan keskiyöllä, kun Spot-hinta on alhaalla.

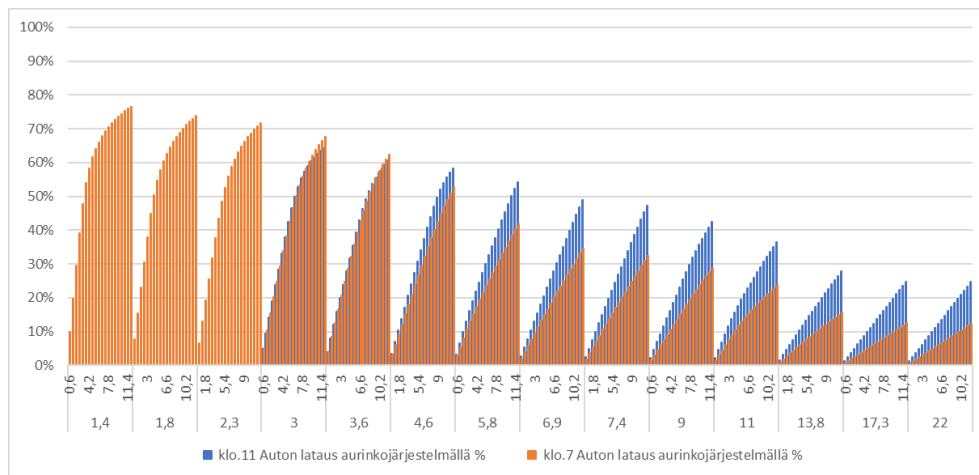
6.4 Lataustehon vaikutus

Lataustehon vaikutusta simuloitiin erikokoisilla aurinkosähkövoimaloilla. Kuvasta 33 voidaan havaita, että kiinteällä latausteholla aurinkosähköstä saa parhaimman hyödyn, kun käytetään maltillista lataustehoa. Lataustehon vaikutus on kaikkiaan vähäistä. Pienellä aurinkosähkövoimalla latausteholla ei ole merkitystä, mutta suuremmilla eroa on nähtävissä. Lataustehokohtaisesti keskimäärin parhaimmat tulokset saadaan, kun latausteho pidetään maltillisena 1,8–5,8 kWh:n alueella. Tuloksessa on huomioitava, että simuloidussa viikko-profiilissa arkilatauksen aloitusajankohta oli noin klo 16, jolloin aurinkosähkövoimalan sähköntuotanto alkaa jo hiipumaan. Latausajankohdan vaikutusta käsiteltiin luvussa 6.2.

		Aurinkosähkövoimalan nimellisteho [kWp]																				
		0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	6,6	7,2	7,8	8,4	9	9,6	10,2	10,8	11,4	12	keskiarvo
Latausteho	1,4	0,6 %	1,3 %	1,9 %	2,5 %	3,2 %	3,8 %	4,4 %	4,9 %	5,4 %	5,9 %	6,3 %	6,7 %	7,0 %	7,3 %	7,6 %	7,9 %	8,1 %	8,4 %	8,6 %	8,8 %	5,5 %
	1,8	0,6 %	1,3 %	1,9 %	2,5 %	3,2 %	3,8 %	4,4 %	5,0 %	5,6 %	6,2 %	6,7 %	7,2 %	7,6 %	8,1 %	8,5 %	8,8 %	9,1 %	9,4 %	9,7 %	10,0 %	6,0 %
	2,3	0,6 %	1,3 %	1,9 %	2,5 %	3,2 %	3,8 %	4,4 %	5,0 %	5,7 %	6,3 %	6,9 %	7,5 %	8,0 %	8,5 %	9,0 %	9,5 %	9,9 %	10,4 %	10,7 %	11,1 %	6,3 %
	3	0,6 %	1,3 %	1,9 %	2,5 %	3,2 %	3,8 %	4,4 %	5,0 %	5,7 %	6,3 %	6,9 %	7,6 %	8,2 %	8,8 %	9,4 %	9,9 %	10,5 %	11,0 %	11,5 %	12,0 %	6,5 %
	3,6	0,6 %	1,3 %	1,9 %	2,5 %	3,1 %	3,8 %	4,4 %	5,0 %	5,6 %	6,3 %	6,9 %	7,5 %	8,1 %	8,8 %	9,4 %	10,0 %	10,6 %	11,2 %	11,7 %	12,3 %	6,5 %
	4,6	0,6 %	1,2 %	1,8 %	2,4 %	3,1 %	3,7 %	4,3 %	4,9 %	5,5 %	6,1 %	6,7 %	7,3 %	7,9 %	8,5 %	9,2 %	9,8 %	10,4 %	11,0 %	11,6 %	12,2 %	6,4 %
	5,8	0,6 %	1,2 %	1,8 %	2,4 %	3,1 %	3,7 %	4,3 %	4,9 %	5,5 %	6,1 %	6,7 %	7,3 %	7,9 %	8,5 %	9,1 %	9,7 %	10,3 %	10,9 %	11,4 %	12,0 %	6,4 %
	6,9	0,6 %	1,1 %	1,6 %	2,2 %	2,7 %	3,3 %	3,8 %	4,4 %	4,9 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,1 %	7,6 %	8,2 %	8,7 %	9,3 %	9,8 %	10,3 %	10,9 %	5,7 %
	7,4	0,6 %	1,1 %	1,6 %	2,2 %	2,7 %	3,3 %	3,8 %	4,3 %	4,9 %	5,4 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,6 %	8,1 %	8,7 %	9,2 %	9,7 %	10,3 %	10,8 %	5,7 %
	9	0,5 %	1,1 %	1,6 %	2,2 %	2,7 %	3,2 %	3,8 %	4,3 %	4,9 %	5,4 %	5,9 %	6,5 %	7,0 %	7,6 %	8,1 %	8,6 %	9,2 %	9,7 %	10,3 %	10,8 %	5,7 %
	11	0,5 %	1,1 %	1,6 %	2,2 %	2,7 %	3,2 %	3,8 %	4,3 %	4,9 %	5,4 %	5,9 %	6,4 %	6,9 %	7,4 %	7,9 %	8,4 %	8,9 %	9,3 %	9,8 %	10,2 %	5,6 %
	13,8	0,4 %	0,8 %	1,1 %	1,5 %	1,9 %	2,3 %	2,6 %	3,0 %	3,4 %	3,7 %	4,1 %	4,5 %	4,8 %	5,2 %	5,6 %	5,9 %	6,3 %	6,6 %	7,0 %	7,4 %	3,9 %
	17,3	0,4 %	0,7 %	1,1 %	1,4 %	1,8 %	2,1 %	2,5 %	2,8 %	3,2 %	3,6 %	3,9 %	4,3 %	4,6 %	5,0 %	5,3 %	5,7 %	6,0 %	6,4 %	6,8 %	7,1 %	3,7 %
22	0,4 %	0,7 %	1,1 %	1,4 %	1,8 %	2,1 %	2,5 %	2,8 %	3,2 %	3,6 %	3,9 %	4,3 %	4,6 %	5,0 %	5,3 %	5,7 %	6,0 %	6,4 %	6,8 %	7,1 %	3,7 %	

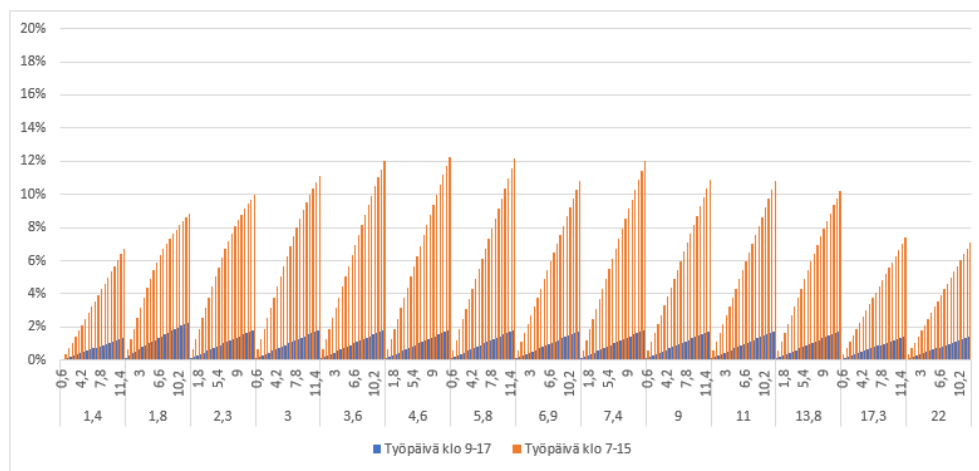
Kuva 33. Lataustehon vaikutus aurinkoenergian hyödyntämisessä.

Kuvasta 34 nähdään, kuinka latausteho vaikuttaa työpäivän aikaiseen lataukseen. Oranssien pylväiden lataus aloitetaan heti kello 7 aamulla, kun taas sinisellä lataus on ajoitettu alkamaan vasta kello 11 päivällä. Siniset pylväät ovat hiivenen paremmat suuremmilla lataustehoilla kuin oranssilla, koska myöhempi ajankohta hyödyntää keskipäivän aurinkoa paremmin. Toisaalta siniseltä puuttuu 1,4–2,3 kW:n lataustehon pylväät, koska lataukseen varattu aikaikkuna ei riittänyt sähköauton lataustarpeelle.



Kuva 34. Lataustehon vaikutukset, kun ladataan klo 7–15 työpäivän aikana.

Jos sähköauton latausajankohta on työpäivän ulkopuolella, on latausteholla enää pieni merkitys. Kuvassa 35 nähdään, kuinka paljon kaksi tuntia myöhemmin alkavalla sähköauton latauksella on vaikutusta. Lataustehon merkitys on muutaman prosentin luokkaa ja myöhemmällä ajankohdalla sitäkin pienempi.

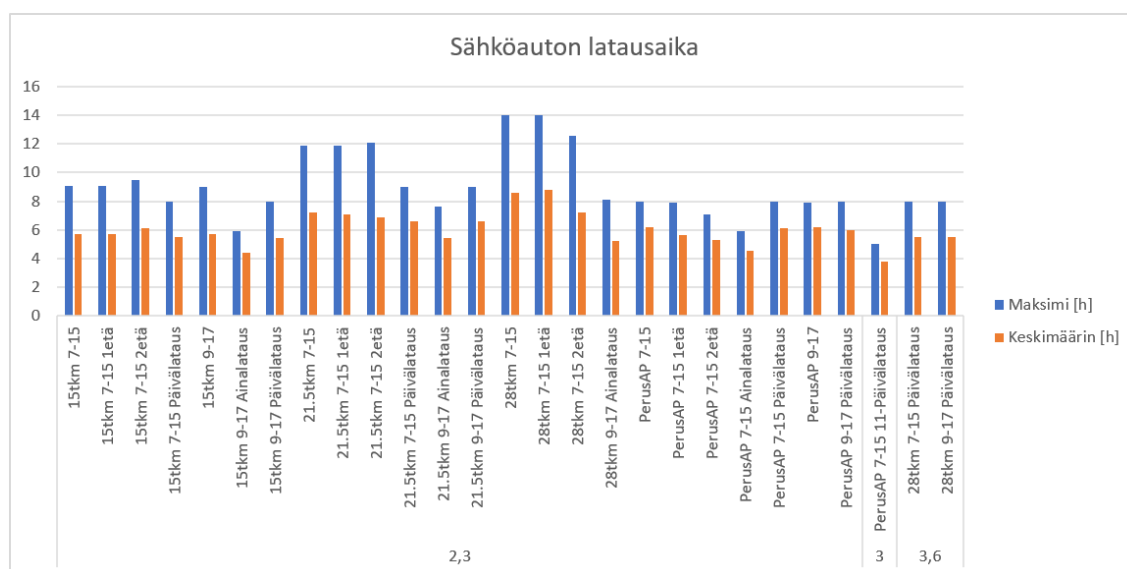


Kuva 35. Latausajankohdan merkitys, kun lataus alkaa työpäivän jälkeen.

Lataukseen tarvittava aika riippuu lataustehosta. Latausajan riittämättömyys ei pääsääntöisesti ole ongelma edes matalilla lataustehoilla. Viikkoprofiileissa määritellyt latauksen aikaikkunat riittävät lataamaan sähköauton akun kaikissa tapauksissa, mutta joissain tapauksissa lataustehoa oli nostettava. Simuloinnissa sähköauton lataus suoritettiin viikkoaikataulun mukaisesti, mikäli

sähköauton akun varaustaso alitti 60 %:n rajan. Lataus pysähtyi viimeistään, kun akun varaustaso saavutti 75 %:n.

Suurin osa simuloituista viikkoprofiileista suoriutui 2,3 kW:n lataustehon kanssa. Ainoastaan ajoitetulla päivälatauksella ja pitkän matkan päivälatauksella lataustehoa oli kasvatettava ajanpuutteen vuoksi (kuva 36).



Kuva 36. Latausajat ja lataustehot eri viikkoprofiilein kuvattuna.

6.5 Etätyöskentely

Etäpäivien viikkoprofiileissa lataus on ajoitettu keskipäivälle. Etäpäiville on lisätty iltapainotteista ajamista, minkä vuoksi tulokset työmatkapituuksien välillä eivät ole lineaarisia. Kuvassa 37 näkyvä prosenttiosuus kertoo, kuinka paljon etätyöpäivällä voi kokonaisuudessaan säästää ostosähkön osuudessa. Esimerkiksi 40 km:n työmatkaa päivässä ajavan ostosähkön osuus laskisi yhdellä viikoittaisella etäpäivällä 9 % ja vastaavasti kahdella etäpäivällä jopa 44 %. Tulokset olisivat paremmat, mikäli simulaatiossa etäpäivien auringonpaiste olisi aina hyödynnetty. Etenkin yhden etätyöpäivän osalta sähköauton lataus ei monesti osunut etäpäivän kohdalle, minkä vuoksi tulokset ovat epälineaariset ja heikot. Simulaatiossa käytetystä sähköauton lataustarpeen määrittelystä kerrottiin luvussa 5.1.

Työmatkan pituus päivässä [km]	Ostosähkön tarve vuodessa [kWh]				
	0 etäpäivää viikossa	1 etäpäivä viikossa		2 etäpäivää viikossa	
40	2110	1914	9 %	1175	44 %
50	2584	2204	15 %	1438	44 %
75	4064	2862	30 %	2156	47 %
100	4903	3773	23 %	2899	41 %

Kuva 37. Etäpäivien vertailu ja kokonaishyöty ostosähkössä.

Aurinkosähkön osuus sähköauton latauksessa kasvaa etäpäiville ajoitetun latauksen vuoksi. Simuloinnin tuloksena (kuva 38) esimerkiksi 40 km/päivä kohdalla aurinkosähkön osuus ei merkittävästi kasva yhdellä etäpäivällä. Mutta kuten edellisestä kuvasta voidaan huomata, etäpäivän hyödyt näkyvät kuitenkin ostosähkön osuudessa, joka tippui 9 % koko vuoden osalta pääosin vähentyneiden ajokilometrien vuoksi.

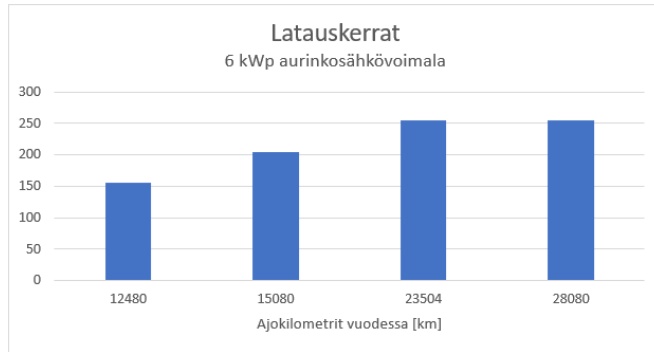
Työmatkan pituus päivässä [km]	Auton lataus aurinkojärjestelmällä %		
	0 etäpäivää viikossa	1 etäpäivä viikossa	2 etäpäivää viikossa
40	6 %	7 %	38 %
50	5 %	9 %	34 %
75	5 %	15 %	26 %
100	4 %	12 %	21 %

Kuva 38. Aurinkosähkön osuus sähköauton latauksesta. Etäpäivien vaikutus.

6.6 Ajomatkat

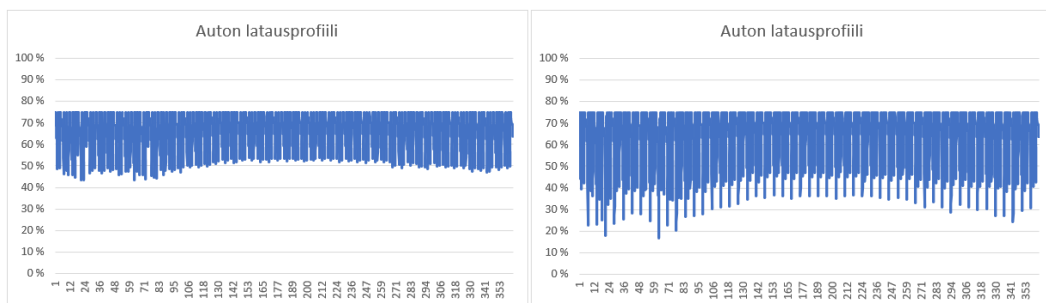
Aurinkosähköä voidaan hyödyntää huomattavan paljon, vaikka ajomäärä olisi reilusti keskimääräistä ajosuoritetta suurempi. Tämä selittyy pääosin latauskerrojen lukumäärän kasvulla. Tiheämmällä latausvälillä aurinkosähkövoimalasta on mahdollista saada enemmän irti, ja sitä käsitellään tarkemmin luvussa 6.9. Kuvassa 39 nähdään sähköverkkoon liitetyn lisäksi myös akkuja hyödyntävän aurinkosähkövoimalan merkitys. Kuvasta 39 voidaan havaita, että yli kaksinkertainen ajomäärää kompensoituu suurelta osin tiheämmän latausvälin vuoksi.

Arkipäivien työmatkan pituuden kasvaessa sähköauton ajoakku tyhjenee nopeammin ja autoa on ladattava useammin. Kun autoa ladataan useammin, saadaan aurinkosähkövoimalasta sekä siihen liitetyistä akuista enemmän irti. Kuvassa 41 nähdään latauskerrat yhden vuoden ajalta.



Kuva 41. Ajomatkan merkitys latauskertoihin.

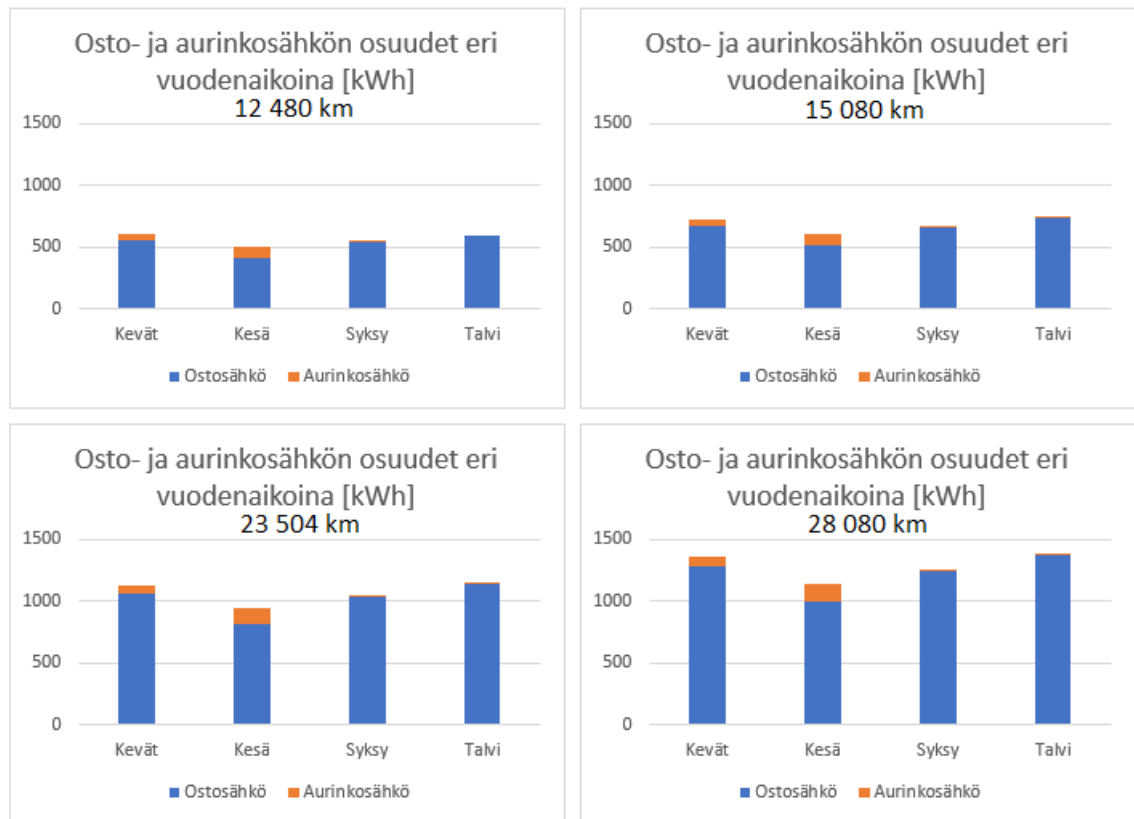
Kuvasta 42 nähdään sähköauton ajoakun varaustilan vaihtelu kahdella eri ajomäärällä. Vasemmanpuoleisesta kuvaajasta voidaan havaita, että ajoakun purkaussyvyys jää alhaisemmaksi lyhyemmän arkipäiväkohtaisen ajon vuoksi. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa on selkeästi syvempi purkaussyvyys. Siinä arkipäivinä ajetaan yli kaksi kertaa pidempää matkaa kuin vasemmalla puolella.



Kuva 42. Sähköauton ajoakun varaustila vuoden aikana. Vasemmalla puolella ajoa kertyy 12 480 km vuodessa, oikealla puolella 28 080 km vuodessa.

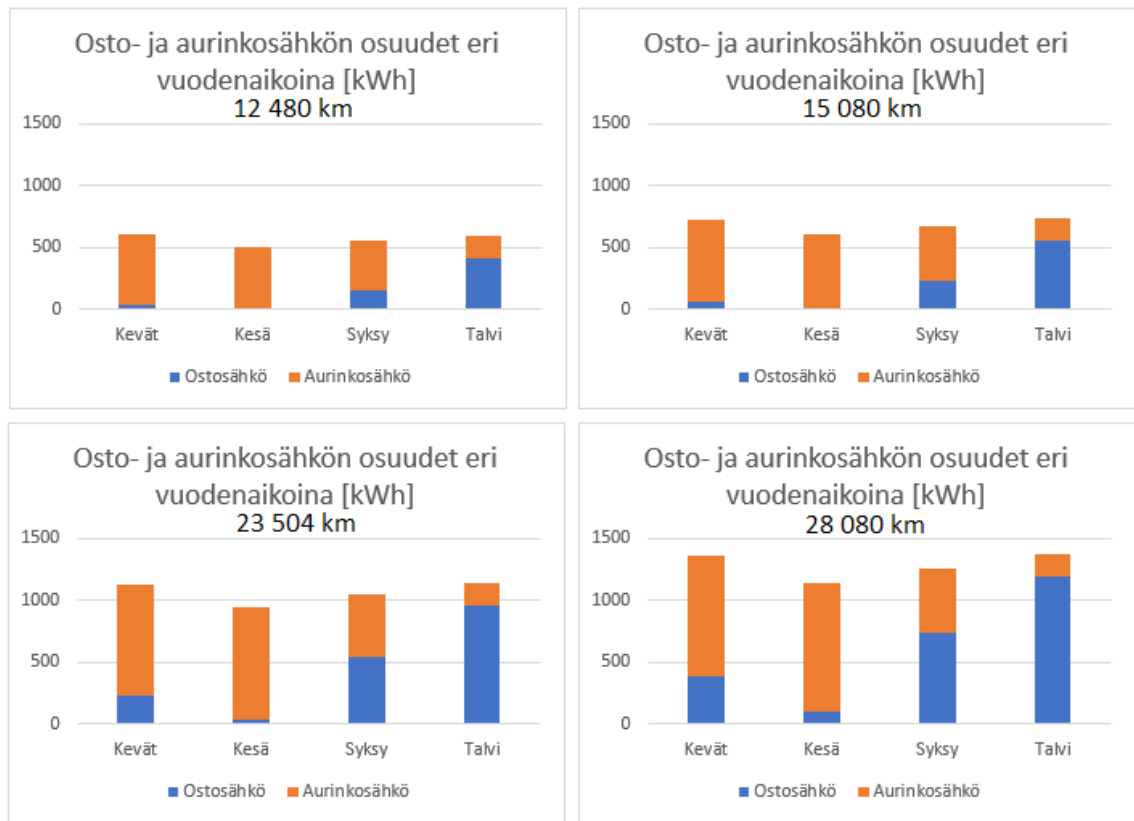
Ostosähkön tarve vaihtelee eri vuodenaikoina. Verkkoon liitetyllä 6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla ostosähköä tarvitaan joka vuodenaikana. Kuvassa 43 vertailaan ostosähkön tarvetta eri ajomäärillä. Kuvasta voidaan havaita, että vuodenajalla ei ole suurta merkitystä, jos ajomatka on lyhyt. Merkitys kasvaa hiukan,

kun ajomatkat pidentyvät. Kuvaajassa on aurinkosähkön osuus oranssilla, mikä kasvaa ajomatkan pidentyessä. Aurinkosähkön osuus jää maltilliseksi latausajankohdan vuoksi, jonka vaikutuksia käytiin aiemmin luvussa 6.4.



Kuva 43. Ajomatkan vaikutus osto- ja aurinkosähkön jakaumaan verkkoon liitettyllä 6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla.

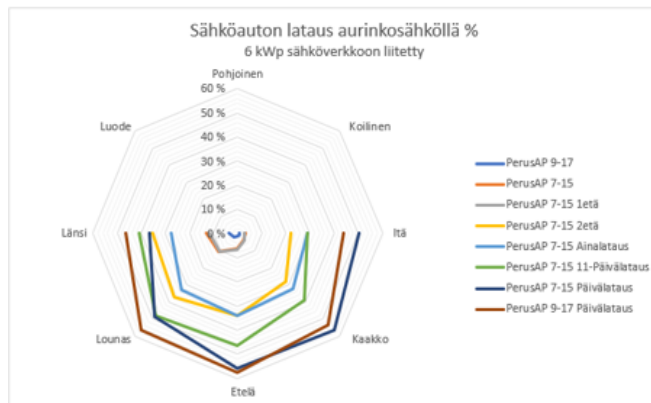
15 kWh:n akkuja hyödyntävässä 6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla ostosähköä tarvitaan akuttomaan järjestelmään verrattuna huomattavasti vähemmän. Kuvassa 44 vertaillaan ostosähkön tarvetta eri ajomäärillä. Kuvasta voidaan havaita, että kevään ja kesän ajalla suurin osa sähköauton sähköenergiasta voidaan tuottaa aurinkosähköllä.



Kuva 44. 6 kW_p:n aurinkosähkövoimala 15 kWh:n akuilla. Ostosähkön tarpeen vertailu eri ajomäärien kesken.

6.7 Aurinkopaneelien ilmansuunnat

Paras hyöty saavutetaan, kun sähköautoa ladataan silloin kun aurinko paistaa aurinkopaneeleille kohtisuorasti. Kuvassa 45 on perusjärjestelmä (luvussa 5.2) eri ilmansuuntiin asennetuilla paneeleilla. Kuvassa havainnollistetaan ilmansuunnan vaikutusta eri viikkoprofiilein. Monessa tapauksessa lounaaseen suunnatuilla aurinkopaneeleilla saadaan parhain tulos. Päivälatauksen osalta kaakko tai etelä ovat ilmansuunnilta hyviä. Kuvasta nähdään, että ilmansuunnalla ja latausajankohdalla on selkeä yhteys. Etelän ja lounaan ilmansuuntien välillä ei ole suuria eroja.



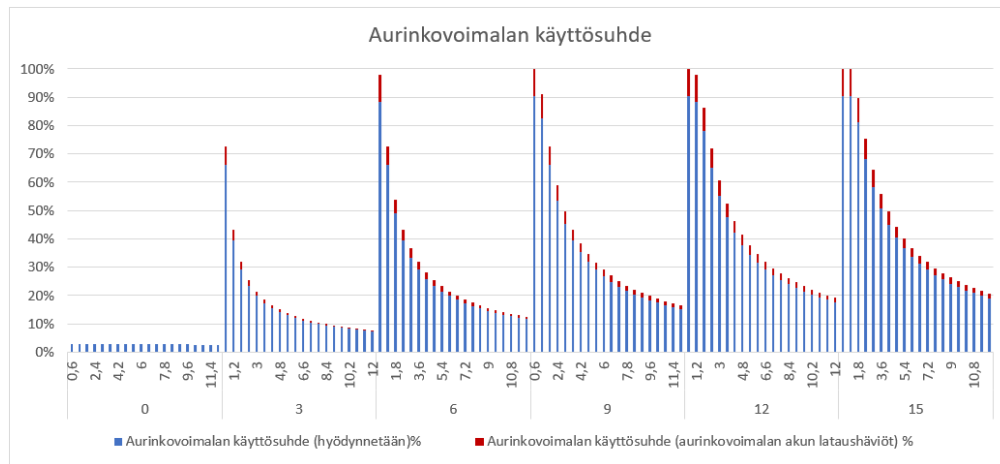
	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi
PerusAP 9-17	1 %	1 %	1 %	2 %	3 %
PerusAP 7-15	3 %	4 %	6 %	11 %	13 %
PerusAP 7-15 1etä	3 %	4 %	7 %	10 %	12 %
PerusAP 7-15 2etä	22 %	28 %	34 %	37 %	35 %
PerusAP 7-15 Ainalataus	29 %	33 %	34 %	33 %	27 %
PerusAP 7-15 11-Päivälataus	29 %	39 %	46 %	48 %	41 %
PerusAP 7-15 Päivälataus	50 %	56 %	56 %	48 %	37 %
PerusAP 9-17 Päivälataus	44 %	53 %	58 %	56 %	46 %

Kuva 45. Ilmansuuntien vaikutus sähköauton latauksessa eri viikkoprofiilein.

6.8 Akkuja hyödyntävä aurinkosähköjärjestelmä

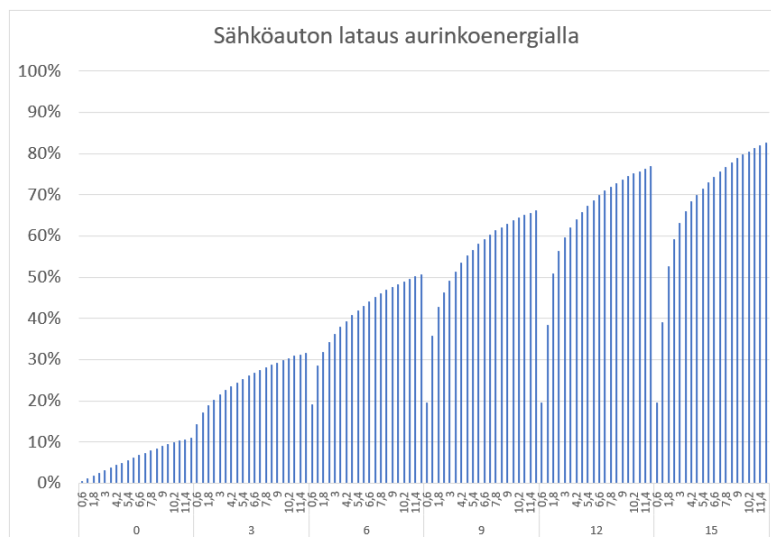
Akkujen käyttö aurinkosähkövoimalan rinnalla antaa mahdollisuuden hyödyntää aurinkosähköenergiaa laajemmalla ajankohdalla. Kuvasta 46 nähdään, kuinka akkujen lisääminen kasvattaa aurinkosähkövoimalan käyttösuhdetta. Kuva kertoo aurinkosähkövoimalan näkökannan, kuinka suuri osa sähköntuotannosta käytetään sähköauton lataukseen. Aurinkosähkövoimalan piikkitehon kasvaessa käyttösuhte pienenee, koska akkukapasiteetti ei kykene varastoimaan kaikkea tuotettua sähköenergiaa.

Akkujen käyttö kuluttaa energiaa akkujen sisäisen vastuksen, kaapelien vastuksen ja ohjauselektronikan yhteisvoimin, mikä muuttuu pääsääntöisesti lämmöksi. Simuloinnissa hukkaenergia otettiin huomioon aurinkosähkövoimalan akkujen latauksessa, jossa akkuja ladattiin käyttäen 90 % aurinkosähkön tuotannosta. Kuvassa 46 on häviön osuutta havainnollistettu punaisella värillä. Simuloinnin tuloksesta nähdään, että häviön osuus pienenee voimalan kasvaessa. Tähän vaikuttaa sähköauton latausajankohta sekä voimalaan liitetyn akuston kapasiteetti.



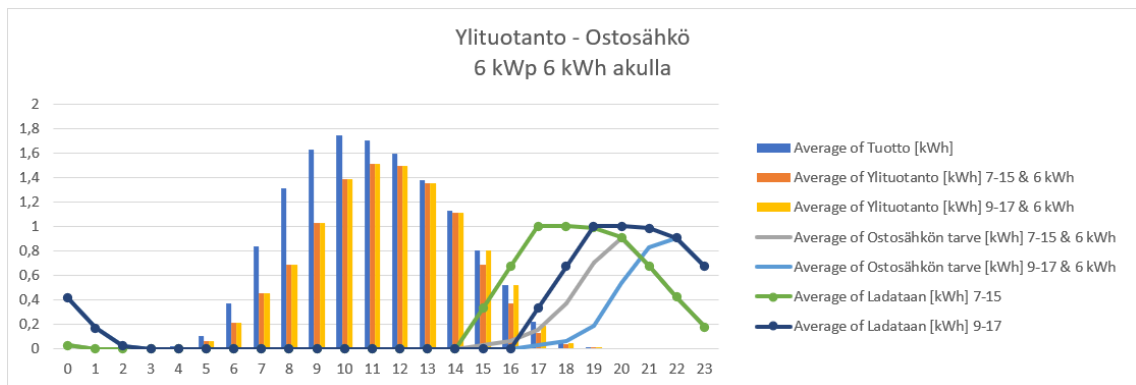
Kuva 46. Käyttösuhde aurinkosähkövoimalan näkökulmasta katsottuna.

Sähköauton kannalta aurinkosähkövoimalaan liitettyjen akkujen merkitys on havaittavissa etenkin silloin, kun sähköautoa ei ladata päiväsaikaan. Esimerkiksi suurimmalla simuloidulla 12 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla, jossa on 15 kWh:n akku, sähköauton koko vuoden latauksista 80 % voidaan tuottaa aurinkosähköllä (ks. kuva 47). Mutta kuten edellisessä kuvassa 46 käy ilmi, tämän kokoisen aurinkosähkövoimalan tuotannosta 80 % jää hyödyntämättä. Simuloiduista pienimmällä 0,6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla (kuva 47), jossa on 3 kWh:n akku, voidaan sähköautoa ladata vuoden aikana enemmän kuin simuloinnin suurimmalla sähköverkkoon liitetyllä järjestelmällä.



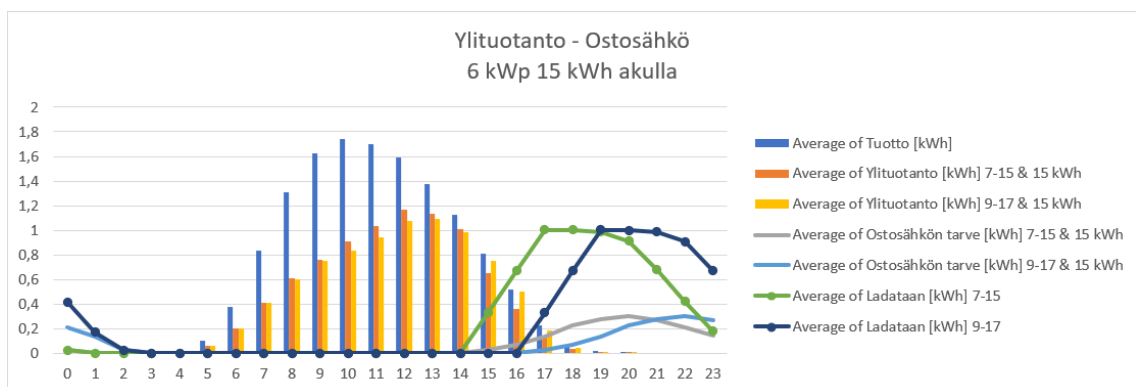
Kuva 47. Sähköauton lataus eri kokoisilla aurinkosähkövoimaloilla, akuilla ja ilman.

Luvussa 6.2 käsiteltiin sähköauton latausajankohdan vaikutusta ja näytettiin, kuinka aurinkosähkövoimalan ylituotanto ja ostosähkön tarve jakautuivat keskimäärin vuorokauden tunneille. Aurinkosähkövoimalaan liitetyllä akustolla saadaan aurinkosähkön tuotannosta osa talteen ja käytettyä myöhemmin ajoittavassa kulutuksessa, kuten sähköauton latauksessa. Kuvassa 48 nähdään, kuinka tuotanto ja kulutus jakautuvat vuorokauden tunneille, kun aurinkosähkövoimalassa hyödynnetään 6 kWh:n akkua. Tällä tavalla sähköautoa voidaan ladata 43 % aurinkosähköllä.



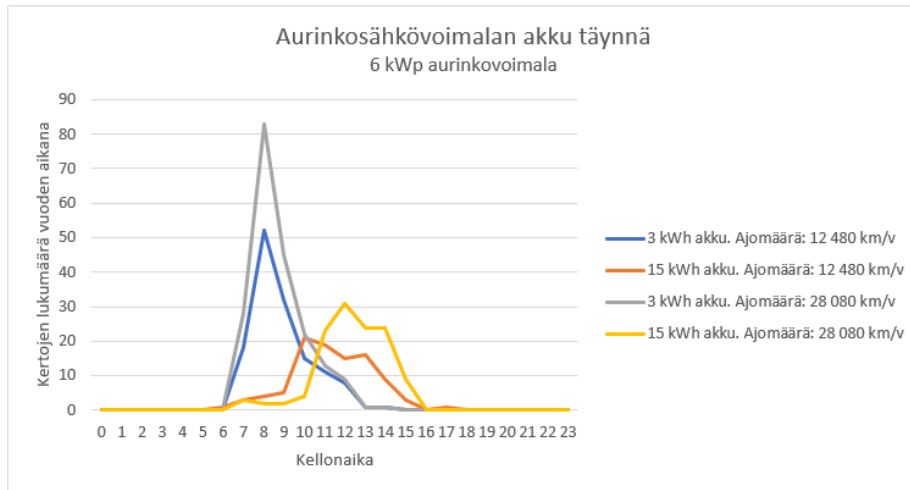
Kuva 48. Ylituotanto ja ostosähkön tarpeen keskimääräinen tuntijakautuma 6 kWh:n akulla.

15 kWh:n akkuvarastoa hyödyntävässä järjestelmässä (kuva 49) kuvaaja muuttuu selvästi. Tässä sähköautoa ladataan 73 % aurinkosähköllä.



Kuva 49. Suuremmalla akulla ostosähkön osuus jää selvästi pienemmäksi.

Akuista saatavan vuotuisen sähköenergian määrä riippuu käyttötiheydestä. Pidempiä matkoja autoileva käyttää aurinkosähkövoimalan akkuja useammin, kuten luvussa 6.6 käy ilmi. Kuvasta 50 nähdään, kuinka monta kertaa vuoden aikana aurinkosähkövoimalaan liitetyt akut ovat keskimäärin täynnä ja mihin kellonaikaan.



Kuva 50. Pidempää ajomatkaa tekevä hyödyntää akkua useammin.

Voimalaan liitetyn akun kapasiteetti jokaista sähköauton latauskertaa kohden voidaan pääsääntöisesti käyttää hyvin. Kuvasta 51 voidaan havaita, että suuremmilla akuilla osuus laskee. Tämä johtuu aurinkosähkön kausiluonteisuudesta. Syksy- ja talviaikaan suuremmat akut eivät täyty heikon auringonvalon vuoksi.

Työmatkan pituus päivässä [km]	Akkukapasiteetin käyttö sähköauton latauskertaa kohden				
	3 kWh	6 kWh	9 kWh	12 kWh	15 kWh
40	94 %	87 %	82 %	74 %	63 %
50	85 %	75 %	69 %	63 %	55 %
75	88 %	79 %	74 %	66 %	59 %
100	88 %	79 %	74 %	70 %	64 %

Kuva 51. Aurinkosähkövoimalaan liitetyn akun kapasiteetin käyttö.

Kevään ja kesän aikana työmatkan pituuden ollessa 100 km (28 080 km/vuosi), 15 kWh:n akun kapasiteetista käytetään keskimäärin noin 90 % joka

latauskerta. Simuloinnin laskentarivejä tarkastellessa oli havaittavissa, että sähköauton ajoakun varaustilasta riippuen aurinkosähkövoimalan akkuun saattoi jäädä 10–20 % kapasiteetista käyttämättä.

Akuilla saadaan talteen merkittävä määrä aurinkosähkövoimalan tuotannosta. Kuvasta 52 nähdään, että akulla saavutettu hyöty on latauskertoihin liitoksissa. Esimerkiksi 15 kWh:n akun kohdalla nähdään, että 40 km:n työmatkaa ajava hyödyntää akkukapasiteettia lähes 1000 kWh vähemmän kuin 100 km:n työmatkaa ajava.

Työmatkan pituus päivässä [km]	Akulla hyödynnetty sähköenergian määrä [kWh]					Sähköauton latauskertoja vuodessa
	3 kWh	6 kWh	9 kWh	12 kWh	15 kWh	
40	446	828	1166	1406	1503	158
50	533	941	1294	1570	1727	208
75	684	1235	1717	2064	2298	259
100	684	1235	1730	2168	2486	259

Kuva 52. Hyödynnetty sähköenergian määrä.

Suurimmalla simuloidulla (12 kW_p) aurinkosähkövoimalalla saatiin 15 kWh:n akulla siirrettyä parhaimmillaan 2 778 kWh aurinkosähkövoimalalla tuotettua sähköenergiaa autolle. Voimalan sähköntuotannosta 6 572 kWh (65 %) jää hyödyntämättä.

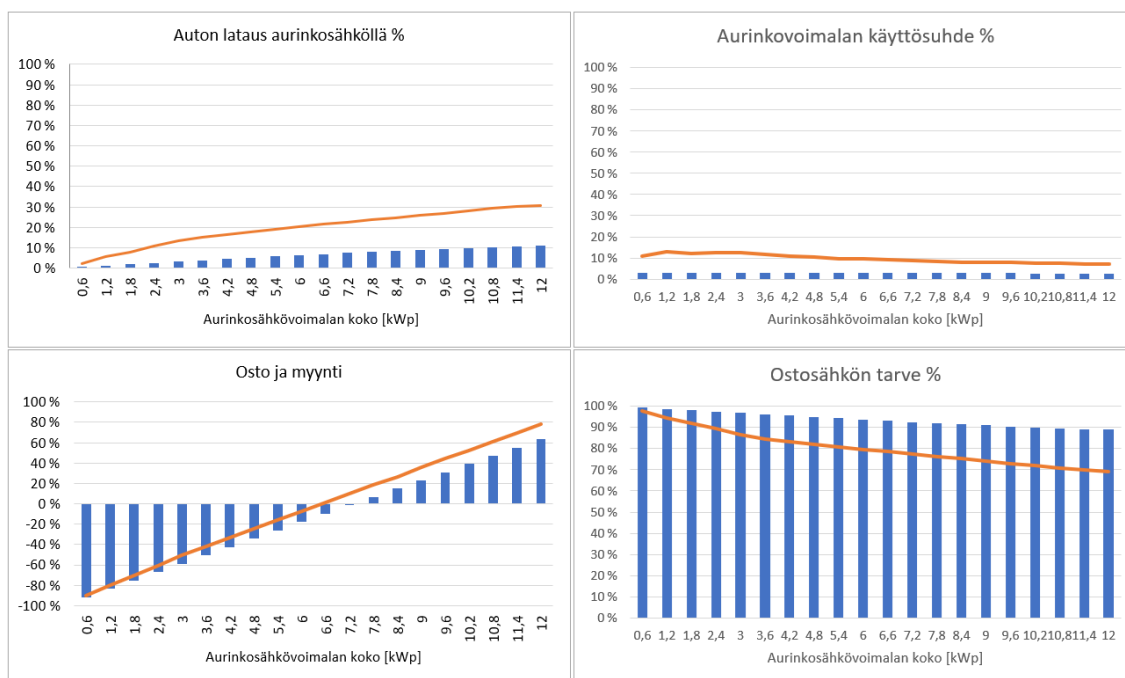
6.9 Aurinkosähkön käyttämätön potentiaali

Aurinkoenergian optimointi ei ole tavanomaisen sähköauton latausaseman perusominaisuus. Jos aurinkosähköä ladataan autoon aina kun sellaista on tarjolla tai aurinkosähkövoimalan akuissa on varausta, voidaan saavuttaa huomattava hyöty. Tämän tyyppinen lataus edellyttäisi ohjausta, jossa aurinkosähkövoimalan tuotantoa tai aurinkosähkövoimalan akkujen varaustilaa mitataan.

Tätä simuloidessa sähköauton akulle määritellyjä rajoja ei muutettu ja sähköauton ajoakua ladattiin normaalisti määritellyjen rajojen osalta. Kun akun alaraja

oli saavutettu, sitä ladattiin ylärajalle asti. Erona normaaliin lataustoimintaan oli, että rajojen välissä ladattiin pelkästään aurinkosähköllä.

Simuloinnin perusteella verkkoon syöttävällä tai pientä akkua hyödyntävällä järjestelmällä saavutetaan parhain hyöty. Kuvassa 53 on sinisin pylväin esitetty normaalin viikkoprofiilin mukaista käyttöä ja oranssilla viivalla esitetään mahdollinen saavutettava hyöty.

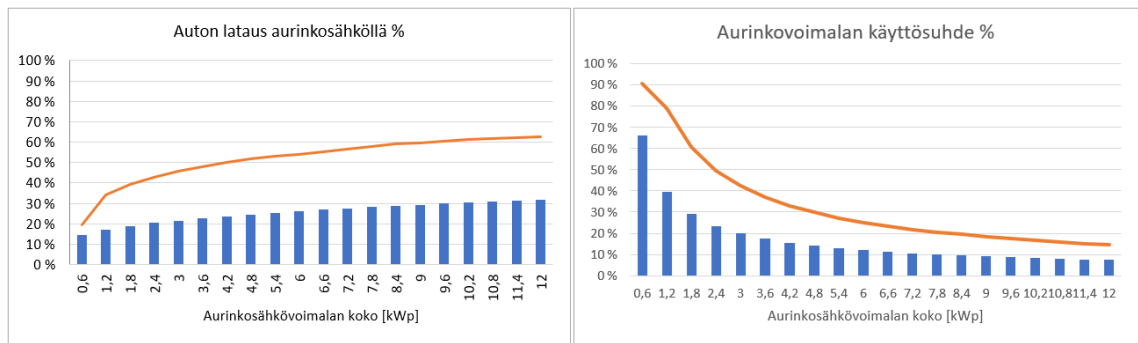


Kuva 53. Verkkoon syöttävä aurinkosähkövoimala. Aurinkosähköllä saavutettava osuus oranssilla viivalla.

Kun tuloksia tarkastellaan 6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla, on verkkoon liitetyllä aurinkosähkövoimalalla mahdollista saavuttaa hyöty seuraavasti:

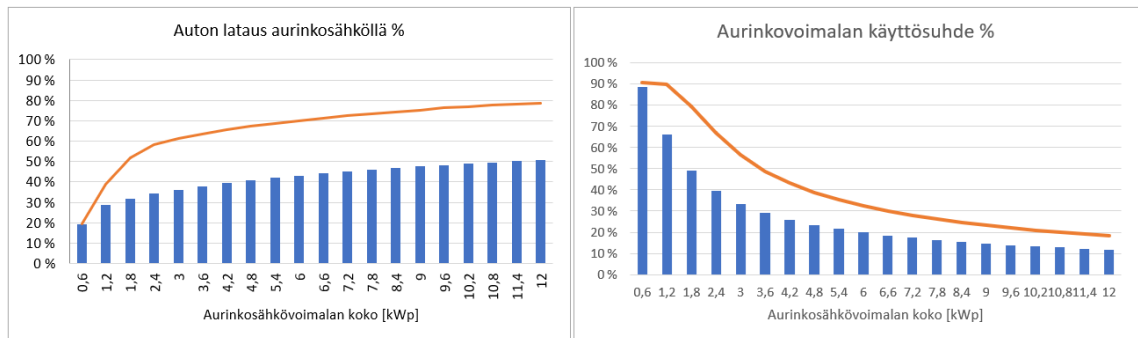
- aurinkosähkön osuus sähköauton latauksessa kasvaa 14,1 %
- ostosähkön osuus tippuu -14,1 %
- aurinkosähkövoimalan käyttösuhte paranee 6,5 %
- omavaraisuusaste paranee 10,9 %.

Akkua hyödyntävässä aurinkosähkövoimalassa on mahdollista saavuttaa sähköverkkoon syöttävään järjestelmään verraten parempia tuloksia. Kuvassa 54 on 3 kWh:n akulla olevan järjestelmän kuvaaja.



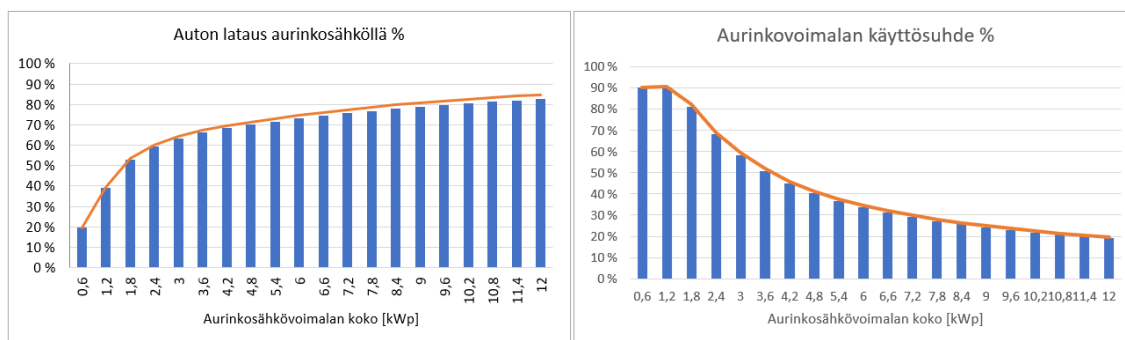
Kuva 54. Aurinkosähkövoimala 3 kWh:n akulla, saavutettavissa oleva osuus oranssilla viivalla.

Saavutettavissa oleva osuus ei kasva loputtomasti akkuja hyödyntävässä järjestelmässä. 6 kWh:n akulla hyötykäyrät asettuvat lähes lopulliseen muotoonsa (kuva 55). Suuremmalla akulla ei ole mahdollista saavuttaa merkittävästi parempaa tulosta.



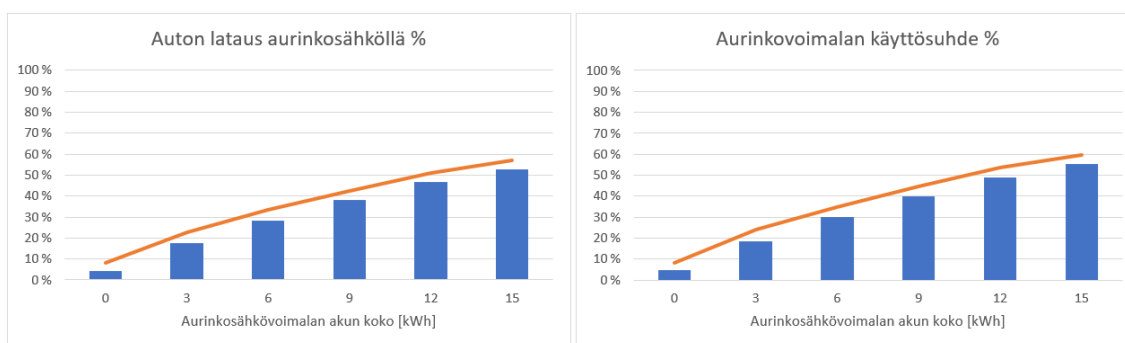
Kuva 55. Aurinkosähkövoimala 6 kWh:n akulla, saavutettavissa oleva osuus oranssilla viivalla.

Kuvassa 56 on simuloinnissa käytetty suurin akku, 15 kWh, josta nähdään, kuinka akun oma hyöty vastaa käytännössä samaa, mitä on mahdollista saavuttaa. Akun kasvatus 6 kWh:sta 15 kWh:iin, saavutettavissa oleva osuus sähköauton latauksessa paranee vain 5 %.



Kuva 56. Aurinkosähkövoimala 15 kWh:n akulla, saavutettavissa oleva osuus oranssilla viivalla.

Pitkiä matkoja ajavan ei ole mahdollista saavuttaa yhtä suurta hyötyä, vaikka aurinkosähköä ladattaisiin autoon aina kun sitä on saatavilla. Saatavilla olevaa osuutta hyödyntäen 15 500 km vuodessa ajava saa 10 %:n parannuksen verkkoon syöttävällä aurinkosähkövoimalalla ja parhaimmillaan 18 %:n parannuksen, jos käytössä on 6 kWh:n akut. 21 500 km vuodessa ajava saa 4 %:n hyödyn sekä verkkoon syöttävällä että akkuja hyödyntävällä aurinkosähkövoimalalla. Kuvassa 57 näytetään 28 080 km vuodessa ajavan summaus 6 kW_p:n aurinkosähkövoimalalla.



Kuva 57. 28 080 km vuodessa ajavan hyödyt jäävät vähäisiksi, noin 4 % (6 kW_p).

6.10 Tuloksien yhteenveto

Aurinkosähkövoimalan kokoa kasvattamalla kasvaa myös sähköauton lataukseen menevä osuus, mutta kasvun suuruuteen vaikuttaa moni asia. Verkkoon liitetystä aurinkosähkövoimalasta kasvattamisen hyödyt jäävät vähäisiksi, mikäli sähköauton lataus tapahtuu klo 15 jälkeen. Tuloksista voidaan havaita, että työpäivän (klo 7–15 tai klo 9–17) ulkopuolella ladattaessa aurinkosähkövoimalan tuotannosta valtaosa jää hyödyntämättä ilman akkuja. Akkuja hyödyntävässä järjestelmässä piikkitehonkasvatuksen merkitys rajoittuu akkukapasiteettiin.

Paras hyöty saavutetaan, kun sähköautoa ladataan aurinkosähkön parhaimpiin tuotantoaikoihin, eli keskipäivällä. Kun sähköautoa ladataan päivän päätteeksi, on muutaman tunnin ajoituksella vaikutusta. Sähköauton lataus aamusta alkaen, esimerkiksi heti työpaikalle klo 7 saavuttaessa, ei hyödynnä aurinkosähkön parhaita potentiaalia. Paremmen hyödyn saa, jos lataus ajoitetaan alkamaan esimerkiksi klo 11 lähtien.

Sähköautoa voidaan ladata laskennallisesti omavaraisesti. Siltä osin, kun sähköauton latauksessa joudutaan turvautumaan ostosähköön, on verkkoon myytävä moninkertaisesti enemmän sähköä. Omavaraisuuteen vaikuttaa, ostetaanko sähköä kiinteähintaisesti vai pörssisähköhintaan.

Lataustehon merkitys riippuu sähköauton latausajankohdasta, kun käytetään kiinteää lataustehoa ja verkkoon liitettyä aurinkosähkövoimalaa. Työpäivän jälkeen ladattaessa aurinkosähkön osuus on muutenkin heikko, ja siksi lataustehon merkitys sähköverkosta ostettavan energiankulutuksen suhteen jää pieneksi. Kun sähköautoa ladataan päivällä aurinkoiseen aikaan, on latausteholla suurempi merkitys. Tuloksien mukaan maltilliset lataustehot soveltuvat aurinkosähkön hyödyntämiseen parhaiten.

Etätyöskentelyn selkein etu tulee ajomäärän vähentymisellä. Etua saa myös, jos etäpäivänä latauksen ajoittaa keskipäivälle. Näiden yhteishyöty voi olla jopa kymmeniä prosentteja ostosähkön vuosittaisessa kulutuksessa.

Ajomäärä vaikuttaa sähköauton lataustarpeisiin, mutta aurinkosähkövoimalan hyödyntämisessä se ei näy samassa suhteessa. Pidempiä matkoja ajavien aurinkosähkön prosentuaalinen osuus heikkenee mutta kilowattituntien määrä kasvaa. Tämä johtuu siitä, että pidempiä ajomatkoja ajavat voivat hyödyntää aurinkosähköä useammin latauskertojen lukumäärän kasvaessa. Akkua hyödyntävän aurinkosähkövoimalan suhteen ajomäärän kasvu vaikuttaa samalla tavalla.

Aurinkopaneelien ilmansuunnalla ja latausajankohdalla on selkeä yhteys. Itä- ja länsisuuntiin suunnattujen aurinkopaneelien tuotanto on keskimäärin heikoin latausajankohdasta riippumatta. Etelän ja lounaan ilmansuuntien välillä ei ole suuria eroja.

Akkujen tarpeellisuus aurinkosähkövoimalassa riippuu sähköauton latausajankohdasta. Jos sähköauton latausajankohta on päivällä, aurinkovoimalan akuista ei saada merkittävää hyötyä. Akkujen paras hyöty saavutetaan, kun sähköauton lataus ajoittuu aurinkosähkövoimalan sähköntuotannon reunamille tai ulkopuolelle. Aurinkosähkövoimalan piikkitehon kasvaessa voimalan käyttösuhte pienenee, koska akkukapasiteetti ei kykene varastoimaan kaikkea tuotettua sähköenergiaa. Latausajankohdan ollessa päivän lopulla voidaan muutaman aurinkopaneelin aurinkosähkövoimalalla, jossa on 3 kWh:n akku, ladata sähköautoa vuoden aikana enemmän kuin 12 kW_p:n sähköverkkoon liitetyllä järjestelmällä.

7 Tutkittava aurinkosähköjärjestelmä

Todellisen kohteen soveltuvuutta sähköauton lataukseen arvioitiin niin ikään simuloimalla kohteen aurinkojärjestelmän tiedoilla. Aluksi kerättiin järjestelmän tiedot ja lopussa arvioidaan, kuinka järjestelmä suoriutuu ja millä tavoin siitä voisi saada parhaan hyödyn. Tutkittavan kohde sijaitsee Sipoossa.

Vaihtosuuntaaja

Tutkittavana olleessa aurinkosähkövoimalassa oleva 4 kW:n yhdistelmävaihtosuuntaaja sisältää 60 A:n lataussäätimen 48 V:n akustoa varten. Laitteessa on yksi MPPT-tulopiste aurinkopaneelistolle, yksi 230 V:n siniaaltovaihtosuunnattu lähtö ja yksi 230 V:n tulo sähköverkkoa varten. Lisäksi laitteessa on sisäänrakennettu vaihtosuuntaajan ohitusrele, jolla lähtö voidaan ohjata syöttämään suoraan sähköverkosta. Laite voidaan konfiguroida käyttötilanteeseen sopivalle tavalle, varavirtalähteeksi tai aurinkoenergiaa hyödyntäväksi. Esimerkiksi jos aurinkoenergiaa ei ole saatavilla ja akusto tyhjä, niin laite syöttää sähköä suoraan sähköverkosta. Laite ei syötä verkkoon päin, joten sähkön myyntisopimusta ei tarvita.

Tutkittavan aurinkosähkövoimalassa olevan yhdistelmävaihtosuuntaajan heikoin puoli on aurinkopaneelistolle annettu avoimen jännitteen maksimi, joka on 145 V. Verkkovaihtosuuntaajassa tämä on tavallisesti 800–1000 V. Tämä johtuu luultavammin akkujen lataukseen käytetystä lataussäätimestä, joka on sisäänrakennettu laitteeseen. Alhainen jännite rajoittaa, kuinka monta aurinkopaneelia voidaan kytkeä sarjaan, joten tehojen noustessa virrat kasvavat. Aurinkopaneelin teknisistä tiedoista selviää, mikä on yhden paneelin avoin jännite.

Aurinkopaneelit

Tutkittavana olleessa aurinkosähkövoimalassa on yhdeksän kappaletta 290 W_p:n monikidepaneeleja. Paneelin teknisistä tiedoista selviää, että V_{oc} on 39,2 V ja lisäksi lämpötilan vaikutus on ilmoitettu V_{oc} 0,3 V/1 °C. Kohteessa aurinkopaneelien asennuskulman takia on epätodennäköistä, että aurinko paistaa

täydeltä taivaalta kohtisuoraan paneeliin 0 °C:n lämmössä, mutta tässä tapauksessa paneelin V_{OC} olisi 46,7 V. Kohteen yhdistelmävaihtosuuntaajan avoimen jännitteen maksimi (V_{OC}) oli 145 V, joten kolme paneelia sarjassa on maksimi. Teknisistä tiedoista selviää myös, kuinka paneelin teho heikentyy iän myötä. Aurinkopaneeleille luvataan 80 % tehosta vielä 30 vuoden päästä.

Teknisistä tiedoista selviävät asennuksen kannalta tärkeimmät tiedot, kuten paneelin fyysiset mitat, sallitut kiinnityspisteet ja paino. Tutkittavassa kohteessa yhdeksän aurinkopaneelia on kytketty siten, että kolme aurinkopaneelia on sarjassa ja kolme sarjaa ovat rinnan. Aurinkopaneelien yhteenlaskettu nimellisteho on yhteensä 2 610 W_p . Trimble Schetsupilla piirretystä havainnollistavasta 3D-mallista (kuva 58) nähdään, kuinka viimeinen aurinkopaneeli varjostuu syyskuun lopulla.



Kuva 58. Aurinkopaneelien varjostus 3D-mallinnuksella.

Aurinkopaneelit on sijoitettu autotallin lounaaseen kohti olevalle lappelle. Sähköauton lataus tapahtuisi pääsääntöisesti työpäivän jälkeen, ja näin ollen lounaaseen kohti suunnattujen paneelien loppupäivän tuottama sähköenergia saadaan käytettyä suoraan sähköauton lataukseen. Päätalossa olisi tilaa myös kaakon suuntaan, mikä olisi ollut vuositheholtaan hyvin samaa luokkaa.

Aurinkosähkövoimalaan liitetyt akut

Kohteessa käytetään LiFePO₄- eli litium-rautafosfaattiakkuja, joiden yhteenlaskettu nimellinen energiakapasiteetti on 30 kWh. Käyttökapasiteettia on latauspurkaussyklissä arviolta 70 % nimelliseen nähden, joten käytettävissä on noin 18 kWh. Akkujen nimellisjännite on 48 V:a, ja kolme 10 kWh:n akkua ovat keskenään rinnankytkettyjä. Jokainen akku sisältää oman akunvalvontajärjestelmän (BMS) ja ylivirtasuojauksen. Akkujen teknisistä tiedoista selviävät akun lataus- ja purkuvirta-arvot. Jatkuva lataus- ja purkuvirta on ilmoitettu 60 A ja hetkellinen maksimivirta 120 A. Akun jännitealueeksi on ilmoitettu 48–57,6 V. Sykliä määräksi on ilmoitettu >3000, 25 °C.

Ajotietoja

Kohteessa ei ole vielä sähköautoa. Kohteessa arvioitiin, että työmatkaa kertyy noin 100 km työpäivälle ja arkeen sopii kaksi etäpäivää. Työaika on noin klo 7–15. Simuloinnissa käytettiin viikkoprofiilia ”28tkm 7–15 2etä”, jossa vuosittaista ajoa kertyy kaikkineen yhteensä 19 760 km. Sähköauto tulee todennäköisesti olemaan keskikokoinen C-segmentin auto, joten simuloinnissa autovaihtoehto numero 1 on tähän soveltuva. Kohteen tiedoilla simulointi laskee koko vuoden keskikulutukseksi 18,6 kWh/100 km.

Sähköauton lataus

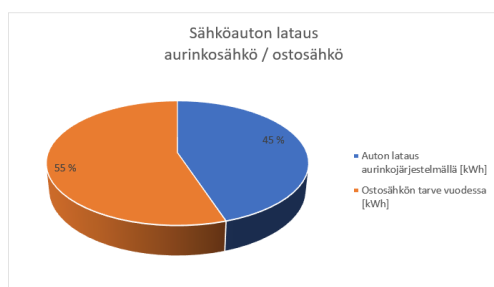
Kohteessa ei ole sähköauton latausasemaa. Latausasemaa on kuitenkin pohdittu, ja siinä tulisi olla ulkoinen ohjausmahdollisuus vähintään latauksen päälle- ja poiskytkennälle. Latausteho tulisi olla valittavissa, mutta dynaamiselle lataukselle ei nähdä tarvetta. Peruslatauksen alimpia lataustehoja tullaan käyttämään yhdistelmävaihtosuuntaajan tehon sekä aurinkojärjestelmään liitettyjen akkujen takia.

Akuista otettava jatkuva virta on huomioitava myös akkukaapeloinnissa. Esimerkiksi jos ladataan 2,3 kW:n latausteholla, 48 V:n akustosta otetaan noin 48 A virtaa. Yhdistelmävaihtosuuntaaja on teholtaan 4 kW, mikä määrittää

sähköauton maksimilataustehon. Latausaika voi olla pitkä, mikäli sähköauton akku on päästetty tyhjäksi. 2,3 kW:n latausteholla illan ja yön aikana sähköautoon on mahdollista ladata noin 30 kWh:n verran, mikä vastaa kohteen kulutuksella noin kahden päivän ajoja.

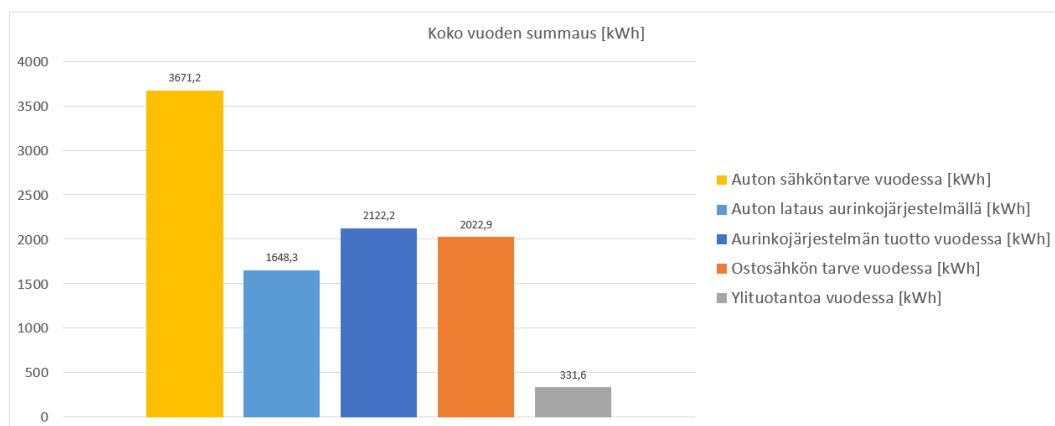
7.1 Simuloinnin tulokset

Simuloinnin mukaan kohteen aurinkosähkövoimalalla voidaan saavuttaa kohtalaisen hyvä lopputulos sähköautoilua ajatellen. Vuoden aikana kohteen järjestelmällä on mahdollista kattaa 45 % sähköauton sähkön tarpeesta pelkästään aurinkosähköllä (kuva 59).



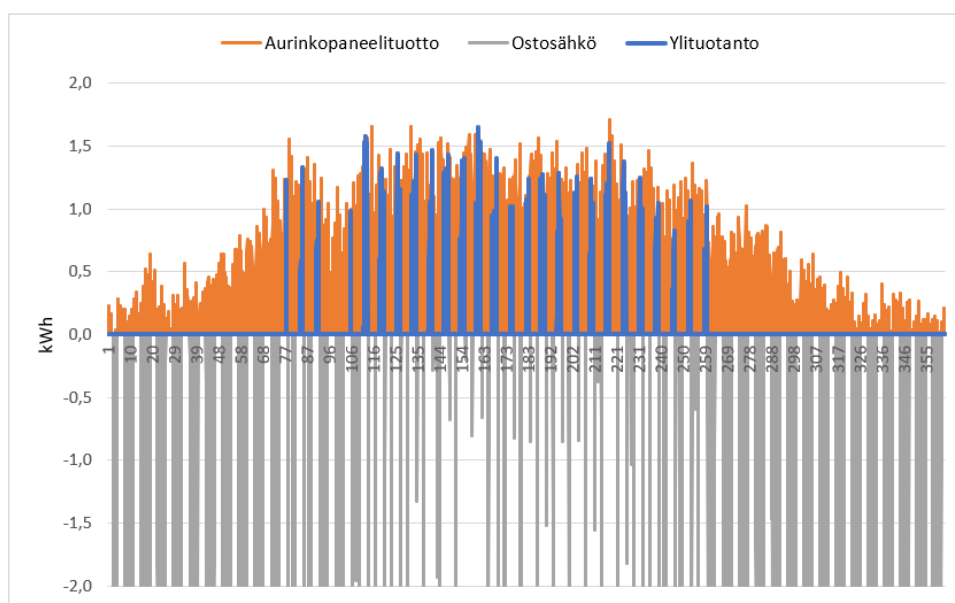
Kuva 59. Sähköauton latausosuus tutkittavan kohteen järjestelmällä.

Pylväin esitetystä kuvasta 60 voidaan havaita yksityiskohtaisemmin, kuinka suhteet painottuvat. Pitkän työmatkan vuoksi sähköauton kulutus on vuoden mittaan suhteellisen suuri.



Kuva 60. Koko vuoden summaus tutkittavassa kohteessa.

Aurinkosähkövoimalan tuotannon ja ostosähkön osuus kuitenkin paljastaa, että kesälläkin tarvitaan ostosähköä (kuva 61). Kuvasta nähdään myös, että ylituotantoa on, vaikka aurinkosähkövoimalan piikkiteho on alhainen ja voimalaan liitetyt akut ovat kohtuullisen suuret. Aurinkopaneelien asennussuuntien vuoksi 2,6 kW_p:n järjestelmän nimellistehosta saadaan parhaimmillaan vain 65 % ulos ja koko vuoden keskiarvo on 32 %.



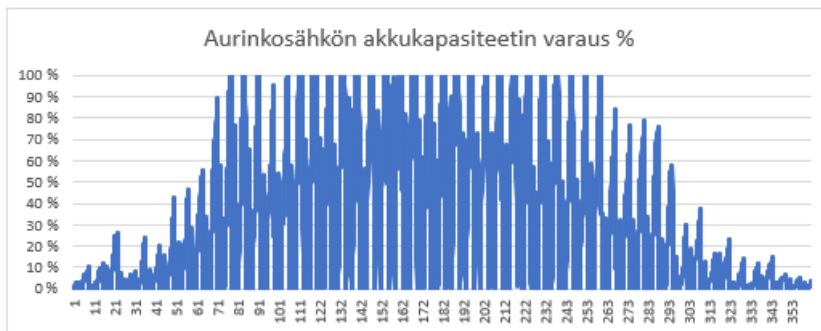
Kuva 61. Tutkittavan kohteen tuotanto- ja kulutusarvot päiväkohtaisesti.

Aurinkosähkövoimalaan liitettyjen akkujen vuoksi voimalasta saadaan 78 % hyödynnettyä (kuva 62). Akkujen käyttö kuitenkin verottaa 7 % tuotannosta. Loput 16 % jää hyödyntämättä, koska sähköä ei myydä verkkoon.



Kuva 62. Tutkittavan kohteen aurinkosähkövoimalan käyttöastejakauma.

Aurinkosähkövoimalaan liitettyjen akkujen käyttö näkyy kuvassa 63. Akkuja käytetään melko hyvin, vaikka kuvasta voidaan havaita, että akkujen kapasiteetti loppuu ajoittain kesken. Yhden päivän tuotanto ei riitä täyttämään akkuja täyteen, sillä kohteen aurinkosähkövoimalan paras vuorokauden tuotanto on noin 13,7 kWh.



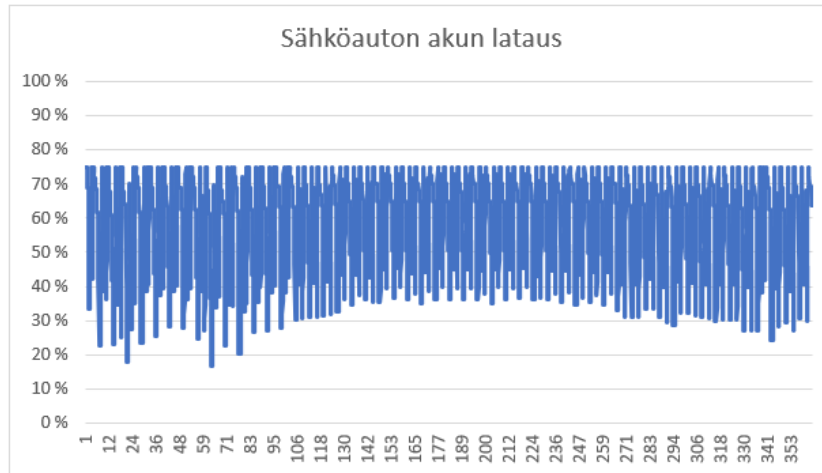
Kuva 63. Aurinkosähkövoimalan akkujen käyttö tutkittavassa kohteessa.

Aurinkosähkövoimalaan liitettyjen akkujen kapasiteettiä hyödynnetään vuoden mittaan kuvan 64 mukaisesti. Vuoden aikana akuista saadaan siirrettyä kaikkiaan 1 286 kWh sähköauton lataukseen. Tämä vastaa noin 61 % koko voimalan vuosituotannosta. Sähköauton koko vuoden lataustarpeesta, sillä katetaan 35 %.



Kuva 64. Aurinkosähkövoimalan akuilla siirretty sähköenergia.

Keskimääräinen latausaika 2,3 kW:n latausteholla on 7,2 tuntia, ja lataussyklejä kertyi 221 kpl vuodessa. Simulaation perusteella ei ole tarvetta nostaa latausteho suuremmaksi. Kuvassa 65 nähdään, kuinka auton ajoakun varaustila elää vuoden mittaan. Kylmän ilman vaikutus kulutukseen on havaittavissa alku- ja loppuvuoden syvempinä purkaussykleinä.



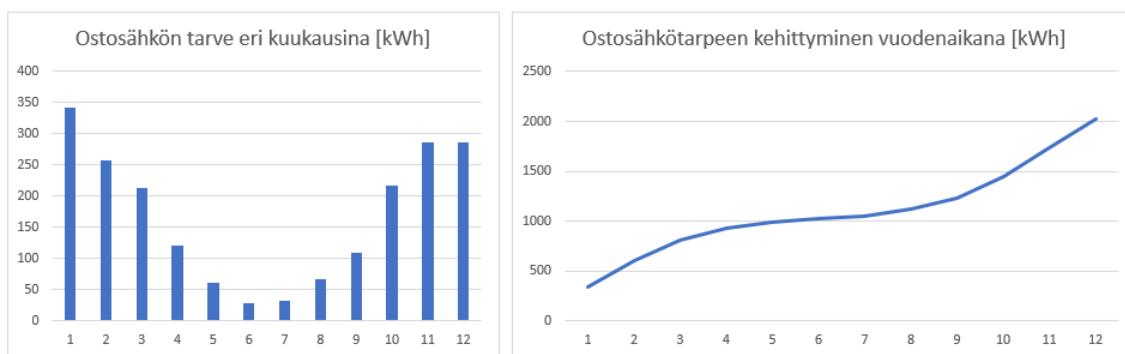
Kuva 65. Sähköauton ajoakun varaustase vuoden aikana.

Aurinkosähkön tuotanto ei riitä kattamaan kohteen sähköauton kulutusta. Kuvassa 66 nähdään, kuinka ostosähkön tarve jakautuu eri vuodenaajoille. Kesällä päästään hyvin lähelle omavaraista ajamista.



Kuva 66. Vuodenaikakohtainen sähköauton lataukseen tarvittava ostosähkön määrä.

Kuukausitasolla katsottuna (kuva 67) tammikuussa on suurin ja kesäkuussa pienin ostosähkön tarve. Vuoden aikana sähköä on ostettava 2023 kWh.



Kuva 67. Kuukausikohtainen sähköauton lataukseen tarvittava ostosähkön määrä.

7.2 Päätelmä

Aurinkopaneelit, akut ja vaihtosuuntaaja ovat nykyisessä ratkaisussa autotalissa. Autotalista löytyy tarvittavat tilat laitteistolle, mihin sähköauton latausasemakin tullaan sijoittamaan. Katolle mahtuisi kolme aurinkopaneelia enemmän, jolloin piikkiteho nousisi 3,48 kW_p:iin. Tämä nostaisi sähköauton latausosuutta 53 %:iin asti, mikä on 8 %:n lisäys nykyiseen verrattuna. Aurinkosähkövoimalan käyttösuhde tippuisi 69 %:iin ja tiputusta olisi nykyiseen 9 %. Kohteessa tämä tarkoittaisi myös sitä, että ylituotantoa tulisi 381 kWh enemmän, mitä yhdistelmävaihtosuuntaajasta johtuen ei voida myydä verkkoon.

Asentamalla aurinkopaneelit päärakennuksen koilliseen osoittavalle lappeelle, jonka harjakulma on 34°, heikentäisi sähköauton lataukselle menevää aurinkosähkön osuutta 2 %. Jyrkempi asennuskulma kompensoi koillisen suunnalta saatavan heikomman tuotannon lähes täysin, ja aurinkosähkövoimala tuottaisi sähköä käytännössä lähes yhtä paljon. Tämä asennus joko edellyttäisi pidemmät kaapeloinnit aurinkopaneeleilta autotaliin, tai päärakennukselta tilat akuille sekä yhdistelmävaihtosuuntaajalle, ja siltikin vaihtovirtakaapelointi pitäisi vetää sähköauton latausasemalle, joka sijaitsee autotalissa. Nykyinen aurinkosähkövoimalan asennuspaikka on näistä vaihtoehdoista parempi.

Aurinkopaneelit on asennettu kiinteästi rakennuksen peltikatolle kiinnitysjalustan päällä olevalle alumiiniselle profiilikiskolle. Paneelit ovat katteesta irti noin 15 cm ja asennettu lappeen suuntaisesti melko ylhäälle. Aurinkopaneelien alta kiertää

ilma, ja lumikuorma jää pieneksi asennuksen ollessa lähempänä katon harjaa. Aurinkopaneelilta lähtevät kaapelit on tuotu alumiiniputkessa harjapellin alta ja ovat siten suojassa ulkoisilta rasitteilta. Aurinkopaneelistolle ei muodostu ylimääräisiä varjostumia, kun vasta syyskuun lopulla auringon ollessa alhaalla.

Kohteen aurinkosähkövoimalan potentiaalista on käyttämättä vain 7 % (125 kWh). Mikäli sähköautoa ladattaisiin aina kun aurinkosähköä on käytettävissä, kasvaisi sähköauton latausosuus 3 %. Tämä jakautuisi siten, että aurinkosähkövoimalaan liitetyistä akuista sähköautoa ladattaisiin 104 kWh ja suoraan aurinkosähkövoimalasta 21 kWh.

Tutkittavan kohteen akkukapasiteetilla aurinkosähköenergiasta voidaan saada 4,5 kertaa enemmän sähköä sähköauton lataukseen verrattuna siihen, mitä pelkästään verkkoon liitetyllä järjestelmällä saadaan. Akkuja käytettiin vuoden aikana 76,6 kertaa käyttökapasiteettinsa verran. Kun akkuja käytettiin, otettiin niistä keskimäärin 5,9 kWh ja parhaimmillaan 17,3 kWh, joka on lähes koko todellinen käyttökapasiteetti. Vuodessa oli 131 päivää, kun akkuja ei käytetty sähköauton lataukseen. Tiheämmällä käytöllä akuista voisi saada enemmän irti, ja silloin myös akku voisi olla pienempi.

Puolet pienemmällä akulla, jolloin nimelliskapasiteettia olisi 15 kWh, saataisiin sähköautoa ladattua 32 % aurinkosähköllä. Tiputusta olisi 13 %, mikä on noin 365 kWh vuodessa vähemmän. Akkuja käytettäisiin 119 kertaa todellisen käyttökapasiteettinsa verran, mikä parantaisi akun käyttösuhdetta. Mikäli sähköautoa ladataan aina kun aurinkosähköä on käytettävissä, voisi aurinkosähköllä ajella 37 % vuoden ajoista ja tiputus olisi vain 8 %. Nykyiset akut ovat jokseenkin ylimitoitettuja, mutta toisaalta ovat pienemmällä rasituksella.

Tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, että kohteen aurinkosähköjärjestelmää on mahdollista käyttää sähköauton lataukseen erittäin hyvin. Asennus on käytötarkoituksen ja vaihtoehtoihin nähden parhaassa paikassa. Järjestelmän piikiteho voisi olla suurempi, ja aurinkosähkövoimalaan liitetty akku voisi olla pienempi. Verkkoon liitetyllä vaihtosuuntaajalla, joka hyödyntäisi myös akkuja, voisi saada ylijäämäsihkon myynnillä taloudellista hyötyä.

8 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin aurinkosähkövoimalla tuotetun sähköenergian hyödyntämistä sähköauton latauksessa. Työssä selvitettiin aurinkosähkön tuottoa sekä sähköautojen kulutukseen ja lataukseen liittyviä seikkoja. Tilastotiedoista selvitettiin keskimääräisiä lämpötiloja, pörssisähkön hintoja sekä ajomatkoja. Tutkimusta varten luotiin Excel-pohjainen simulaatiotyökalu. Simulaatioiden valtavasta määrästä pyrittiin löytämään olennaisimmat tiedot ja havainnollistamaan kiinnostavimmat tulokset. Tutkimuksessa saatiin hyvä käsitys siitä, kuinka suuri vaikutus kokonaisuuteen on ajettavalla matkalla, sähköauton kulutuksella, aurinkojärjestelmän teholla, aurinkosähköjärjestelmän akun koolla sekä sähköauton latausajankohdalla.

Insinööriyön haastavin osuus oli varmistaa, että simulaatiotyökalu oli toimiva ja tuotti uskottavaa tietoa. Excel soveltui työkaluna työhön hyvin, vaikka usean ehtolauseen sisältävä kaavarivi oli välillä jopa tuntien työn takana. Tämän lisäksi haasteita aiheutti sähköautojen todellisen kulutuksen selvittäminen.

Työssä onnistuttiin kuvaamaan monta asiaa, jotka vaikuttavat aurinkosähköenergian hyödyntämiseen sähköauton latauksessa. Simulaatiotyökalun tietokannasta saatiin monia asioita esille vertailemalla erilaisien muuttujien vaikutuksia. Työn avulla on mahdollista arvioida tapauskohtaista hyötyä ja auttaa suunnittelemaan tähän soveltuvaa kokonaisjärjestelmää. Tutkimuksesta rajattiin sähköautojen keskinäisten ajo-ominaisuuksien vaikutusten vertailu. Tutkimusta voisi jatkaa perehtymällä esimerkiksi työajokäytössä olevien autojen mahdollisuuksiin. Tutkimusta varten kehitetty Excel-laskentatyökalun jalostaminen julkiseen käyttöön voisi olla hyvä kehityskohde.

Lähteet

- 1 Hiilamo, Elli-Alina & Heima, Timo-Pekka. 2022. Liikennepäästöt. Verkkoinfo. Yleisradio Oy. <<https://yle.fi/a/3-12669595>>. 28.10.2022. Luettu 22.11.2022.
- 2 EU Joint Research Center PVGIS -laskentatyökalu. 2023. Verkkoinfo. European Union, 1995-2023, European Commission. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en>. Päivitetty 3.1.2023. Luettu 3.1.2023.
- 3 Tahkokorpi, Markku, Erat, B., Hänninen, P., Nyman, C., Rasinkoski, A & Wiljander, M. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into.
- 4 Myy tuottamasi aurinkosähkö meille. Verkkoinfo. Keravan Energia Oy. <<https://www.keravanenergia.fi/aurinkosahko/hyvitys-aurinkovoimalan-tuotannosta>>. Luettu 30.11.2022.
- 5 Ylijäämäsähkön myynti. 2022. Verkkoinfo. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti>. Päivitetty 9.8.2022. Luettu 30.11.2022.
- 6 Energian hinnat. Verkkoinfo. Tilastokeskus. <<https://www.stat.fi/tilasto/ehi>>. Luettu 30.11.2022.
- 7 Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. 2018. Verkkoinfo. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase>>. 13.4.2018. Luettu 15.2.2023.
- 8 Koponen, Jarmo. 2022. Sähkön hinta. Verkkoinfo. Yleisradio Oy. <<https://yle.fi/a/3-12634406>>. 25.9.2022. Luettu 13.3.2023.
- 9 Perälä, Rae. 2017. Aurinkosähköä. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy.
- 10 Invertteri. 2018. Verkkoinfo. Purotokka Oy. <<https://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkovoimala/invertteri>>. 13.2.2018. Luettu 20.11.2022.
- 11 Käpylehto, Janne. 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into Kustannus Oy.
- 12 Sähköajoneuvojen lataussuositus. 2021. Verkkoinfo. Sesko. <https://sesko.fi/wp-content/uploads/2021/11/SESKO_lataussuositus_2021-02-17.pdf>. 17.2.2021. Luettu 20.11.2022.

- 13 SFS 6000-7-712:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7- 712: erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät. 2017. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 14 Lataaminen ja toimintamatka. Verkkoaineisto. K Auto Oy. <<https://www.volkswagen.fi/fi/sahkoautot/lataustavat.html>>. Luettu 26.11.2022.
- 15 Linja-aho, Vesa. Sähköautot ja latausjärjestelmät 2021. Luentomateriaali. Vesa Linja-aho Tmi. 3.2.2022.
- 16 Schwarzer, Volker & Ghorbani, Reza. 2015. Current State-of-the-Art of EV Chargers. Verkkoaineisto. University of Hawaii at Manoa. <<https://www.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/Current-State-of-the-Art-EV-Chargers.pdf>>. 31.3.2015. Luettu 12.3.2023.
- 17 Svarc, Jason. 2023. Home Solar EV Charging Explained. Verkkoaineisto. Clean Energy Reviews. <<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-ev-charging>>. 10.1.2023. Luettu 24.1.2023.
- 18 Why Mobile Phone Batteries do not last as long as an EV Battery. 2018. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/why-mobile-phone-batteries-do-not-last-as-long-as-an-ev-battery>>. Päivitetty 26.9.2018. Luettu 23.1.2023.
- 19 Charging at High and Low Temperatures. 2022. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures>>. Päivitetty 1.3.2022. Luettu 23.1.2023.
- 20 Webasto Pure II -sähköauton latausasema, Type2, 11 kW, 4,5 m. Verkkoaineisto. Verkkokauppa.com Oyj. <<https://www.verkkokauppa.com/fi/product/682345/Webasto-Pure-II-sahkoauton-latausasema-Type2-11-kW-4-5-m>>. Luettu 26.11.2022.
- 21 Luukkanen, Joose. 2018. Sähköauton tekniikkaa osa 2: Akun lataaminen. Verkkoaineisto. Tyyliniekka. <<https://tyyliniekka.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-2-akun-lataaminen>>. 15.9.2018. Luettu 23.1.2023.
- 22 Current and Upcoming Electric Vehicles. Verkkoaineisto. EV Database. <<https://ev-database.org>>. Luettu 19.3.2023.
- 23 Sähköauton toimintamatka. Verkkoaineisto. K Auto Oy. <<https://www.volkswagen.fi/fi/sahkoautot/toimintamatka.html>>. Luettu 19.3.2023.

- 24 Tesla Model X 90D (vm 2017) koeajoraportti. 2021. Verkkoaineisto. Autotie.fi. <[https://www.autotie.fi/tien-sivusta/sahkoautoileva-motoristi/tesla-model-x-90d-\(vm-2017\)-koeajoraportti](https://www.autotie.fi/tien-sivusta/sahkoautoileva-motoristi/tesla-model-x-90d-(vm-2017)-koeajoraportti)>. 24.9.2021. Luettu 19.3.2023.
- 25 Lämpötilatilastot. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintäministeriö. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/1991-2020-lampotilatilatost>>. Luettu 10.2.2022.
- 26 Liikennesuoritteet. Verkkoaineisto. Tieliikenteen Tietokeskus Oy. <<https://www.aut.fi/tilastot/liikennesuoritteet>>. Luettu 9.2.2022.
- 27 Henkilöliikennetutkimus 2016: Suomalaisten liikkuminen. 2018. Verkkoaineisto. Liikennevirasto. <<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-513-6>>. 8.3.2018. Luettu 8.2.2022.
- 28 Liikenteen verotuksen uudistamista selvittävän työryhmän väliraportti. 2020. Verkkoaineisto. Valtiovarainministeriö. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-317-5>>. 21.8.2020. Luettu 7.2.2022.
- 29 Tuntispot-hinnat Sähköporssissa. Verkkoaineisto. Vattenfall Oy. <<https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/porssisahko/tuntispot-hinnat-sahkoporssissa>>. Luettu 21.5.2023.