



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Sami Lagerroos

Tehohuippujen hallinta sähköajoneuvojen latauksessa

Tekniikan ja
innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

| | | |
|--------------------------|---|----------------------|
| Tekijä: | Sami Lagerroos | |
| Tutkielman nimi: | Tehohuippujen hallinta sähköajoneuvojen latauksessa | |
| Tutkinto: | Tekniikan kandidaatti | |
| Oppiaine: | Sähkö- ja energiatekniikka | |
| Ohjaaja: | Kimmo Kauhaniemi | |
| Valmistumisvuosi: | 2025 | Sivumäärä: 28 |

TIIVISTELMÄ:

Tässä tutkimuksessa otin selvää, kuinka tulevaisuuden tarpeisiin sähköajoneuvojen latauksen osalta pystyttäisiin vastaamaan. Sähköajoneuvojen määrän odotetaan nousevan vuoteen 2030 mennessä 800 000 ajoneuvoon. Sähköajoneuvot ovat siksi tulevaisuudessa vaikuttava tekijä tehohippujen kasvuun. Tässä tutkimuksessa tutkittiin Suomen sähköistyvän liikenteen energiantarvetta ja saatiin selville, että energiaa on tarpeeksi kasvavaan latauskysynnän tarpeeseen. Lataustehon kysynnän kasvettua tarvitaan kuitenkin mahdollisesti toimenpiteitä liian suurten tehohippujen välttämiseksi. Vaikka energiaa on tarjolla, sähköverkko ei pysty ohjearvojen ylittäviä tehoja syöttämään.

Tavoitteena työllä oli luoda selkeä kuva latauksien vaikutuksista tehohippuihin ja niiden mahdollisista parannusmahdollisuuksista. Tarkoituksena oli lisäksi antaa aiheesta kiinnostuneille oppia, parempaa ymmärrystä tehohippuista, niiden vaikutuksista sekä hallinnasta tulevaisuudessa.

Tehohuippujen mahdollisiksi ongelmakohtiksi tulevaisuudessa osoittautuivat paikalliset ja alueelliset jakeluverkot. Talviaikana sähköajoneuvojen energiankulutuksen kasvu osoittautui vaikuttavasti suuremmaksi kuin lämpiminä vuodenaikoina. Erityisesti älykkäillä latausratkaisuilla olisi mahdollista pienentää ongelmakohtien muodostumista. Mahdollisia ratkaisuja kuormitusten hallintaan tarjosivat signaali-ohjatut latausjärjestelmät sekä dynaamiset kuormanhallinnat.

Tässä tutkielmassa tehdyn selvityksen perusteella todettiin, että Suomessa paikallisten ja alueellisten jakeluverkkojen ongelmakohtien ei uskota kuitenkaan tuovan suuria haasteita. Erityisesti korkealla jännitetasolla ei odoteta isoja huolenaiheita sähköajoneuvojen kasvuennusteen vaikutuksista. Ohjatut lataukset auttoivat pitämään sähköverkkoa tasapainossa. Älykkäillä ohjauksilla oli lisäksi mahdollista pienentää verkkohaltijoiden ja yksityishenkilöiden kustannuksia.

AVAINSANAT: sähköauto, tehohiput, tehopiikit, kaupunkiverkot, latausstrategiat, verkko-vaikutukset

Sisällys

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Johdanto | 4 |
| 2 | Erilaiset latausmahdollisuudet | 6 |
| 3 | Sähköajoneuvojen määrä | 9 |
| 3.1 | Lataustehon kysynnän kasvu | 10 |
| 3.2 | Vaadittu teho | 10 |
| 3.3 | Mahdolliset skenaariot | 11 |
| 4 | Kuormituksen muodostuminen | 13 |
| 4.1 | Tehohuippujen syntyminen | 13 |
| 4.2 | Latausaikojen ja lämpötilojen vaikutukset | 14 |
| 4.3 | Vaikutus sähköverkkoon | 16 |
| 5 | Latausasemat | 17 |
| 5.1 | Älykkäät latausmahdollisuudet | 17 |
| 5.2 | Verkkoliittymät | 19 |
| 5.3 | Kustannustehokkuus | 20 |
| 6 | Pohdinta | 21 |
| 7 | Yhteenvedo | 23 |
| | Lähteet | 25 |

1 Johdanto

Maapallolla puhtaampaan talouteen siirtymisessä liikenteestä johtuvien hiilidioksidipäästöjen vähentämisellä on tärkeä osa. Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi teollisuus ja Suomen hallitus ovat lähteneet tukemaan sähköajoneuvoja ilmansaasteiden, ilmastonmuutoksen ja öljynriippuvuuden hallitsemiseksi (Valtionneuvosto, 2023). Teknologiateollisuuden artikkelista (2024) selviää, että sähköiseen liikenteeseen siirtymisen on mahdollistanut kehittynyt akkuteknikka. Saastumiseen liittyvät huolet ovat kuitenkin suurin syy sähköajoneuvoihin siirtymiselle. Siirtyminen uuteen luo aina haasteita. Sähköverkkojen latausinfrastruktuuria ei ole kehitetty tulevaisuuden tarpeita varten, mutta sitä pyritään kehittämään koko ajan varmemman latausverkoston takaamiseksi.

Kopsakangas-Savolaisen ja Meriläisen (2018) mukaan ongelmakohtiksi ovat muodostumassa asuinalueiden paikalliset ja alueelliset sähköjakeluverkot ja niihin kohdistuvat kuormitukset. Nykyisten jakeluverkkojen kanssa on huomioitava sähköajoneuvoista johtuvat lisäkuormitukset ja niiden latausvaatimukset. Tikkanen ja muut (2021) osoittavat, että tämä ongelma korostuu entisestään kylminä talviaikoina, sillä matalat lämpötilat ovat suoraan verrannollisia akustojen suorituskykyyn, energiankulutukseen ja latausaikaan. Talviaikaan sähköajoneuvojen latauksista johtuva energian kulutus on suurempaa ja toistuvampaa.

Tehohuiput asettuvat yleensä niihin ajankohtiin, kun ihmiset palaavat töistä hyvin samoihin aikoihin ja asettavat sähköajoneuvonsa latautumaan muun sähkönkulutuksen lisäksi (Torriti, 2016). Verkko ylikuormittuu saadessaan liian paljon kuormaa, jos sillä ei ole tarvittavaa joustavuutta. Tämä voi johtaa heikkoon sähkönlaatuun kertoo Haakana (2021).

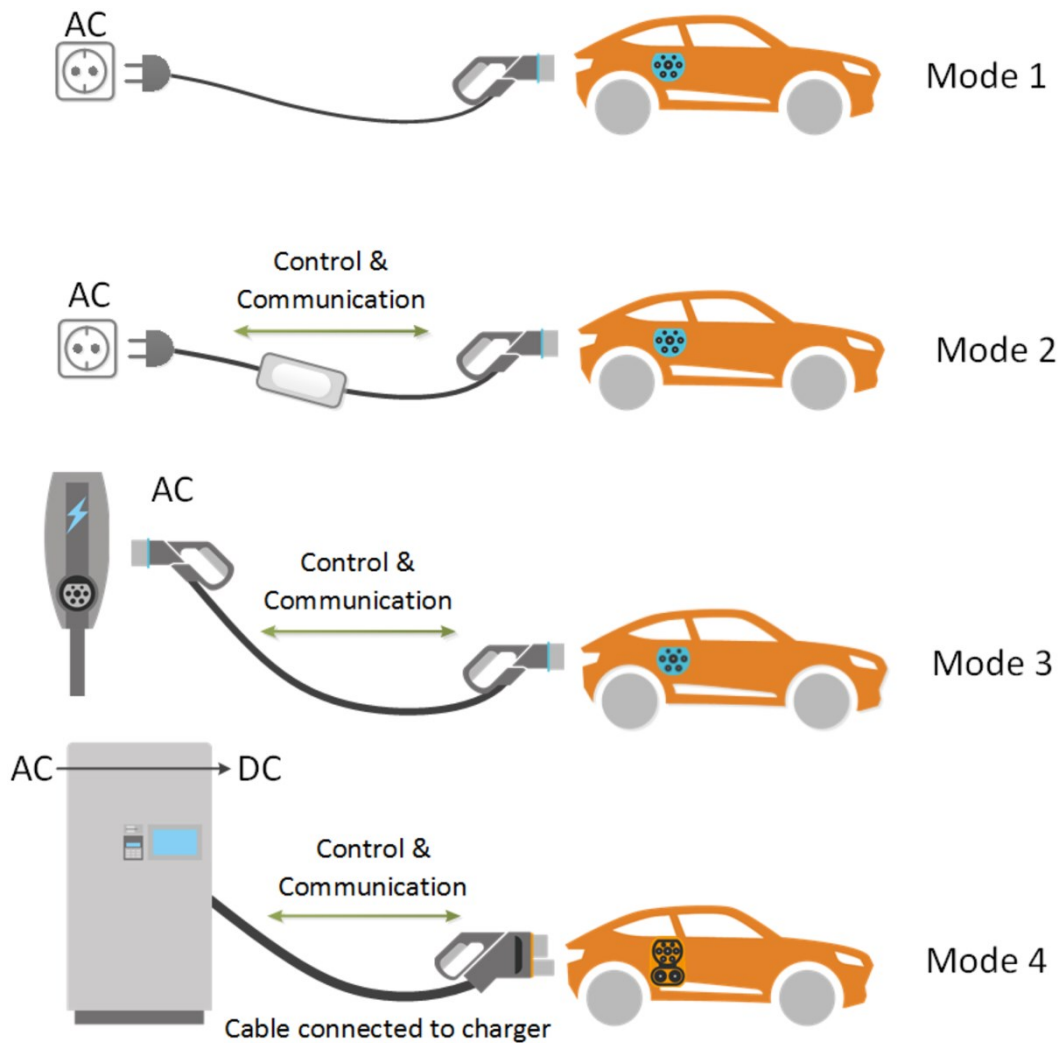
Tutkimus käsittelee sähköverkon muutostarpeita, sillä sähköajoneuvoista aiheutuva sähkönkulutuksen kasvu on hallittava. Tutkimuksessa tullaan käsittelemään erilaisia latausmahdollisuuksia sekä niiden ominaisuuksia. Tarkoituksena on myös tarkastella sähköajoneuvoista syntyviä sähkönkäytön kasvuvaihteluita. Näiden jälkeen perehdytään te-

hohuippuihin, niiden syntymiseen ja vaikutuksiin. Lopussa tutkimus antaa tietoa älyk-
käistä latausmahdollisuuksista ja niiden vaikutuksista tehohuippuihin. Tämä työ on tar-
koitettu henkilöille, jotka ovat kiinnostuneita sähköisestä liikenteestä.

Yksi tutkimuksen päätavoite on syventyä sähköajoneuvoista aiheutuvan energiankulu-
tuksen kasvuennusteeseen. Eri lähteiden avulla pyritään pohtimaan sähköverkkojen ka-
pasiteettien kyvykkyyttä vastata energian kysynnän kasvuun, erityisesti tehohuippuihin.
Tavoitteisiin kuuluu perehtyminen erilaisiin latausstrategioihin ja pohditaan niiden vai-
kutusta sähköverkkojen siirtotehoihin. Työssä tulen selvittämään keinoja verkon hallin-
taan, mitkä pystyisivät mahdollistamaan sähköajoneuvojen lisääntyvät lataukset ilman
mahdollisten epästabiilisuuksien syntymistä verkossa. Lisäksi tutkimuksessa sivutaan
sähköinfrastruktuurin kehittämisen tarpeesta koituvia investointikustannuksia tilan-
teissa, joissa sen kapasiteettia on vahvistettava tai laajennettava.

2 Erilaiset latausmahdollisuudet

Erilaisia lataustapoja on tällä hetkellä käytössä 4, selviää Seskon artikkelista (2023). Kuvassa 1 on esitetty havainnollistavasti kaikki lataustavat.



Kuva 1. Erilaiset lataustavat (Deltrix, n.d.).

Seskon (2023) mukaan lataustapa 1 on tarkoitettu kevytrakenteisille ja pienitehoisille sähköajoneuvoille. Lataustapa 1 on vaihtosähköllä tapahtuvaa latausta, joka on vikavirtasuojalla varustettu. Tapa 1 kuuluu hitaan latauksen tyyppiin. Tämän vuoksi se soveltuukin paremmin yön yli lataamiseen.

Lataustavassa 2 sähköajoneuvo ladataan vaihtosähköllä joko kotitalous- tai teollisuuspistorasiasta asianmukaisella latausjohdolla, joka sisältää vikavirtasuojan ja ohjauselektronikan. Ohjauselektronikka pystyy määrittämään, kuinka suuren virran auto voi vastaanottaa. Kotitalouspistorasiasta ladattaessa virta rajoitetaan 8 ampeeriin, jolloin latausteho on noin 1,8 kW. Lataustapa 2 on myös hidas latausmenetelmä, jonka vuoksi sekin soveltuu paremmin yön yli lataamiseen (Wang ja muut, 2021). Latautumisaajan ollessa pitkä on kuormituksen vaikutus pitkäkestoisempaa. Tehohuippuihin vaikutus on kuitenkin pienempää, kun kyseessä on pienempi kuorma.

Seskon (2023) mukaan lataustapa 3 on sähköajoneuvoille suositeltavin lataustapa. Tämä lataustapa kuuluu myös vaihtosähköllä tapahtuviin latausmenetelmiin. Latausvirta on toteutettu maksimissaan 3x63 ampeerin syötöllä ja latausaika on lyhyempi. Riippuen mahdollisesta virran syötön määrästä pystytään tyyppin 2 pistokkeella, joka kuuluu standardiin SFS-EN 62196-2, syöttämään matalampiakin latausvirtoja. Lataustavassa 3 on sisällytettyä mahdollisuus latausaseman ja ladattavan ajoneuvon tiedonsiirron välittämiseen toistensa kanssa tiedonsiirtoväylällä. Kuorman hallinta ja virran säätäminen tapahtuu myös väylällä. Lataustavassa 3 pitää pystyä toteuttamaan älykästä latausmahdollisuutta erilaisten mahdollisten tilanteiden salliessa. Lataustapa 3 vähentää pitkiin latausaikoihin liittyvää ongelmaa eli kasaantuvan energiankulutuksen mahdollisuutta. Tämä vaatii kuitenkin enemmän energiaa kerralla, mikä taas nostattaa hetkellisiä tehohippuja.

Seskon (2023) mukaan lataustavassa 4 sähköajoneuvoja ladataan tasasähköllä ja se kuuluu teholatureihin. Lataustavassa 4 käytetään tasasähkölaturia, joka muuntaa vaihtosähkön tasasähköksi ennen ajoneuvon syöttämistä. Tämä mahdollistaa auton latauspiirissä olevan tasasuuntaajan ohittamisen eli suoraan akuston lataamisen (Sesko, 2023). Tämän ansiosta lataustehot pystyvät olemaan vaihtosähkölatureita suurempia (Scanoffice, n.d.). Tässä lataustyyppissä ladattava ajoneuvo ja laturi keskustelevat myös keskenään väylän avulla (Sesko, 2023). Teholatureilla pystytään vähentämään pitkien latausaikojen ongel-

mia, mutta hetkelliset tehohiiput ovat kuitenkin huomattavasti suurempia muihin lataustyyppisiin verrattuna. Suuret äkilliset tehohiiput eivät vaikuta positiivisesti tehohiippujen vähentämiseen erityisesti huippukäyttöaikoina.

3 Sähköajoneuvojen määrä

Sähköajoneuvojen kehitys ja latauspaikkojen lisääntyminen ovat nostaneet ihmisten luottamusta hankkia sähköajoneuvoja (Teknologiateollisuus, 2024). Sähköajoneuvojen määrän kasvua lisää myös autojen tuotantotehtaiden asettamat tavoitteet polttomootorilla varustettujen autojen tuotannon vähentämiseen ja jopa lopettamiseen kokonaan. Suomessa sähköajoneuvot ovat saaneet nostetta poliittisesta tuesta ja jotkut yritykset tarjoavatkin sähköajoneuvoja edullisempiin hintoihin työsuhdeautoiksi. Kuvan 2 kaaviosta pystyy toteamaan, että sähköajoneuvojen määrän kehitys on saanut vauhtia viime vuosien aikana. Suomessa henkilöautojen määrä on noin 2,7 miljoonaa (Tekniikan Maailma, 2023). Tällä hetkellä Suomen autokannassa 240 000 henkilöautoa on ladattavia, joista 94 000 on sähköautoja ja 150 000 on ladattavia hybridejä, kertoo Mikkonen (2024). Vuonna 2030 arvioidaan ladattavien autojen määrän olevan noin 800 000, joista 500 000 olisi sähköautoja. Sähköajoneuvojen määrän kasvu on noususuhdanteista, joka tulee jatkuvasti lisäämään energiankulutusta niiden osalta.

Kuvassa 2 on Tekniikan Maailman (2023) esittämä arvio autokannan tulevaisuudesta. Arvio on tehty vuoteen 2060 asti. Kaaviosta pystyy huomaamaan arvion olevan vuonna 2030 erittäin samansuuruinen Mikkosen (2024) kirjoittaman arvion mukaan, eli voidaan todeta ennusteiden olevan lähes samaa kokoluokkaa näillä lähteillä.



Kuva 2. Autokannan määrän ennuste (Tekniikan Maailma, 2023).

3.1 Lataustehon kysynnän kasvu

Sähköautojen ja ladattavien hybridautojen määrän kasvu tulee nostattamaan sähkötehon kysyntää, sekä latausinfrastruktuurin kehitystä entisestään. Kopsakangas-Savolaisen ja Meriläisen (2018) mukaan lataustehon kysynnän kasvu vaikuttaa enemmän kaupunkialueilla, joissa sähköajoneuvojen tiheys on suurempi kuin vähemmän asutuilla paikkakunnilla. Kysynnän kasvaessa pitää tarjonnan pystyä vastaamaan todelliseen tilanteeseen. Sähkön kulutuksen määrän kasvu tulee olemaan suoraan yhteydessä tehohuippujen kasvuun ilman hallittuja menetelmiä. Sähköajoneuvojen synnyttämien kuormien oikea ennustaminen on oleellinen osa nopean kehityksen tukemista (Shan ja muut 2016).

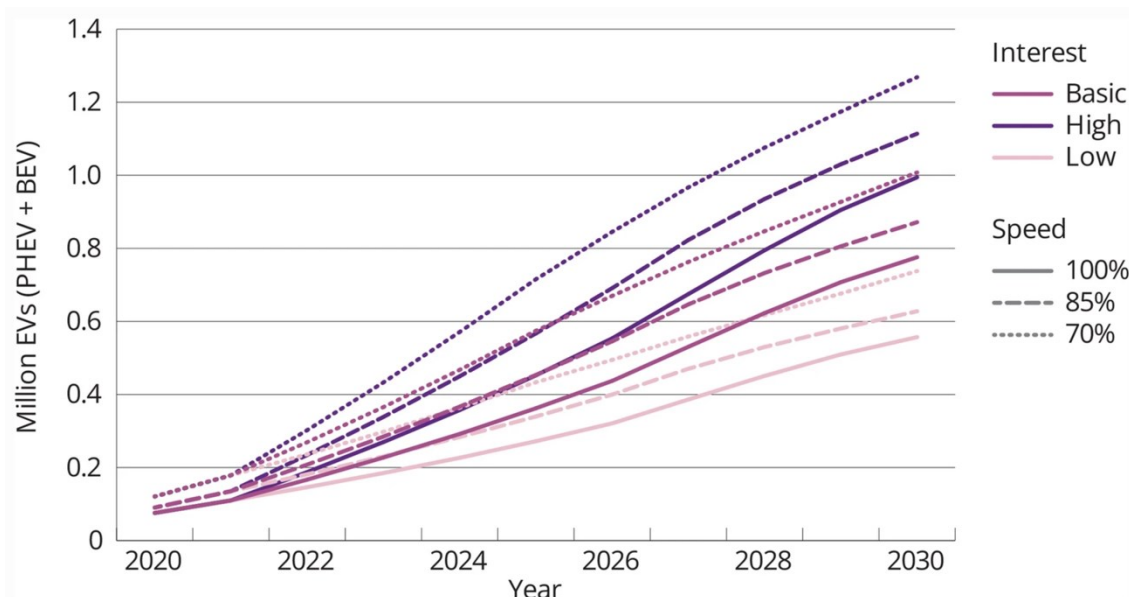
3.2 Vaadittu teho

Vaadittu teho määräytyy energian kulutuksen mukaan. Virran verkkoaineiston (2018) mukaan suomalaisella käytössä oleva sähköauto kuluttaa kuukausittain 280 kWh. Kulutus on laskettu sähköautojen kulutuksen keskiarvon mukaan. Tähän on huomioitu vuodenajat sekä päivittäin ajettujen kilometrien keskiarvo Suomessa. Laskemalla kuukausittaisen kulutuksen 2030 vuoden tilanteen arvion pohjalta voidaan todeta sähköautojen kuluttavan noin 140 GWh/kk. Arvion mukaan vuonna 2030 sähköautojen vaatima energia olisi noin 1,70 TWh/a. Ladattavien hybridautojen kulutus verrattuna sähköautoihin on vähäisempää, sillä ne kulkevat osan matkasta polttomoottorilla. Ladattavien hybridien todelliset kulutukset vaihtelevat riippuen siitä, kuinka paljon on mahdollista ajaa sähkömoottorilla. Laskemalla sähköllä ajettavien kilometrien osuuden 60 prosentin mukaan, mikä on noin 168 kWh kuukaudessa, saadaan hybridautojen kuukausittaiseksi kulutukseksi vuoden 2030 arvion mukaan noin 50 GWh/kk. Näin ollen vuonna 2030 ladattavien hybridien kulutuksen osuus olisi vuodessa noin 605 GWh/a, mikä tarkoittaa ladattavien hybridautojen ja sähköautojen yhteenlasketun energiantarpeen olevan 2,31 TWh/a. Suomessa kokonaiskulutus vuonna 2023 oli noin 80 TWh (Tilastokeskus, 2024). Tämä tarkoittaa, että sähköajoneuvojen energiantarve vuonna 2030 olisi vuoden 2023 kulutetusta energianmäärästä noin 3 %.

Sähköajoneuvot ovat vain yksi osuus energiankulutuksen määrästä ja todellisen tarvittavan kapasiteetin määrää kokonaiskulutus. Tällä arviolla kuitenkin pystytään näkemään sähköajoneuvojen energiantarve, määrittämään ongelmakohtia ja huomioon otettavia asioita, joita pitää pohtia tulevaisuudessa sähköajoneuvojen lisääntyessä.

3.3 Mahdolliset skenaariot

Viri ja Mäkinen (2024) tekivät simuloinneissaan tutkimusta sähköautojen lisääntymisen eri skenaarioista. Heidän tutkimuksensa perustuu vuosien 2022–2040 välille. Tutkimus perustuu kiinnostuksen todennäköisyyteen vaihtaa polttomoottorisista ajoneuvoista sähkökäyttöisiin ajoneuvoihin. Näin pystytään tarkastelemaan autokannan kehitystä. Tutkimuksessa on käytössä matalan kiinnostuksen skenaario, perusskenaario ja korkean kiinnostuksen skenaario. Lisäksi tutkimuksessa on käytetty eri nopeuskertoimia jokaisessa skenaariossa. Perusskenaarion oletuksena on, että autokannan keski-ikä on noin yksitoista vuotta. Perusskenaarion mukaan Suomessa tulisi olemaan vuonna 2030 noin 750 000 sähköajoneuvoa. Siihen sisältyy ladattavat hybridautot ja sähköautot, kun taas korkean kiinnostuksen skenaariossa normaalilla nopeuden kertoimella määrä tulisi olemaan noin miljoona. Matalan kiinnostuksen skenaarion vaikutuksia ei tarkastella tarkemmin, sillä niiden toteutumisella ei ole merkittävää vaikutusta tähän työhön. Tarkastellessa tilannetta, jossa odotetaan korkeinta kasvua, tulisi määrä olemaan noin 1,3 miljoonaa ajoneuvoa. Ohessa vielä kuva 3 simuloinnin tuloksista vuoteen 2030 asti.



Kuva 3. Kuvaaja skenaariosta Viri ja Mäkinen (2024).

Ihmisten kiinnostuksen kasvamisen myötä sähköajoneuvoja tulee tulevaisuudessa lisää liikenteeseen. Tähän kuitenkin vaikuttaa myös autojen keski-ikä. Aiemmin todettiin perusskenaariossa keski-ian olevan noin yksitoista vuotta. Pientämällä autojen keski-ikää kasvaa todennäköisyys uusien sähköajoneuvojen kasvavalle kehitykselle. Tähän saattaisi vaikuttaa esimerkiksi uusien autojen verotuksen laskeminen.

Sähköajoneuvojen suurimman kasvun skenaariossa tulisi vaikutukset olemaan huomattavasti suurempia perusarvioihin verrattuna. Laskemalla kasvu samassa suhteessa ladattavien hybridautojen ja sähköautojen määrässä, tulisi energiantarve olemaan noin 3,75 TWh vuonna 2030. Tämä tarkoittaisi noin 1,6 kertaista energiantarpeen nousua verraten aiemmin laskettuun ennusteeseen.

4 Kuormituksen muodostuminen

Tehohuippu on hetkellisesti tietyllä aikaikkunalla tapahtuva korkean sähköenergian kysynnästä johtuva kuormitus (Torriti, 2016). Tikkasen ja muiden (2021) kirjoittamasta loppuraportista selviää, että tehohuiput riippuvat useista tekijöistä, kuten kiinteistöstä, säästä, viikonpäivästä, vuodenajasta, kellonajasta ja muiden tekijöiden summista. Sähköajoneuvojen lisääntyminen luo lisää kuormituksia. Kuormituksen lisääntyminen on haasteiden avainasemassa, sillä jos kuormituksella ei olisi merkitystä voitaisiin sähköajoneuvoja ladata äärettömästi, sekä käyttää muita sähkölaitteita runsaasti riippumatta energiankulutuksesta. Latauksen keskittyminen päivän suurimpien kulutushetkien yhteyteen eli huippukulutusaikoihin on asiayhteys, joka lisää kuormitusta nostattaen tehohuippujen riskiä. Latauskuormille merkityksellistä on se, että missä, miten ja milloin lataus tapahtuu.

4.1 Tehohuippujen syntyminen

Tehohuippujen syntymisen ymmärtämisessä on huomioitava muutamia asioita. Tuotannon ja kysynnän on aina pysyttävä yhtä suurina, sillä sähköverkolla ei ole kykyä varastoida energiaa ja syöttää sitä kuluttajille joustavasti aina heidän tarpeidensa mukaan (Torriti, 2016). Nykyään on silti aloitettu rakentaa ja kehittää akustoja, joihin pystytään varastamaan energiaa kantaverkon tukemiseksi (Laukkanen, 2023).

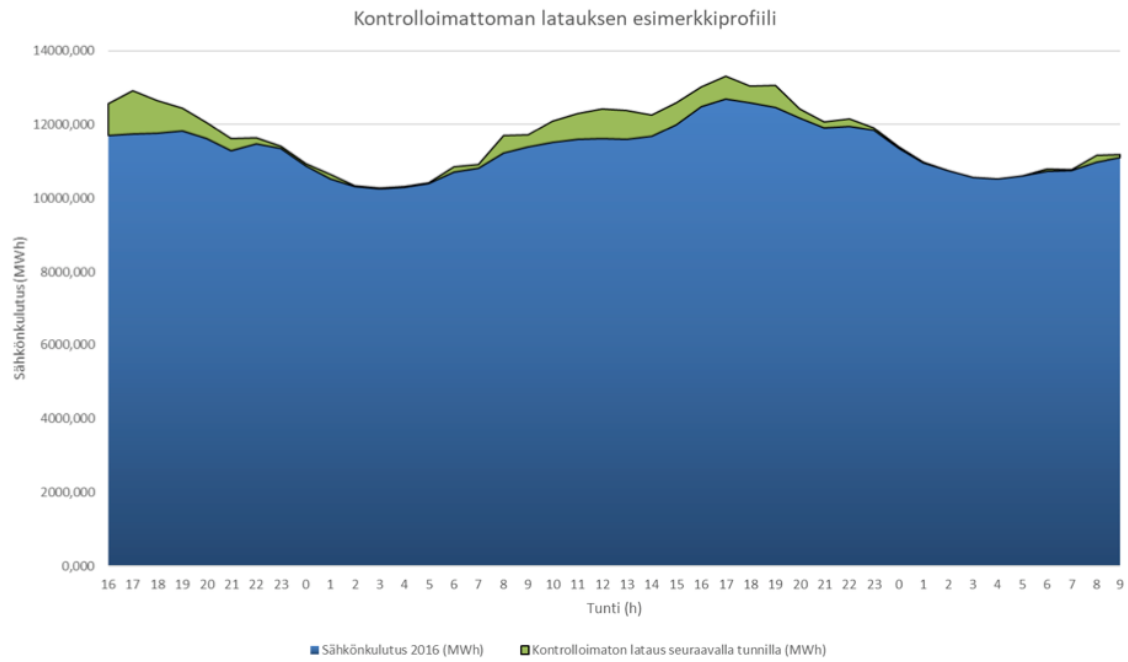
Torritin (2016) mukaan tehohuiput syntyvät usein sellaisilla hetkillä, kun lämpötilat ovat hyvin alhaisia tai korkeita. Jos tähän vielä yhdistetään ajankohta, jolloin ihmiset palaavat kotiin samanaikaisesti työpäivän jälkeen ja kytkevät päälle kodin sähkölaitteita, jolloin sähköenergian kulutus korostuu pienelle aikaikkunalle eli tehohuippujen riskit nousevat. Tehohuiput johtuvat monesti tavallisista asioista, mutta sitä eivät kuluttajat aina välttä mättä tiedosta. Sähköverkko kuormittuu, kun tuhannet ihmiset tekevät samat asiat samaan aikaan. Haakanan ja muiden (2013) mukaan Suomessa ja muissakin pohjoismaissa kylmän ilmaston takia latausprosessi kuluttaa energiaa enemmän kuin lämpimän ilmaston omaavissa maissa. Kylmällä säällä akustot tarvitsevat enemmän energiaa.

Latauksen lisääntymisen aiheuttamat tehohuiput eivät synny lineaarisesti, vaan eksponentiaalisesti. Aoun ja muiden (2024) mukaan jokainen lisääntyvä sähköajoneuvon latausprosessi luo todennäköisyyttä samanaikaisille latauksille, mikä johtaa riskiä suurempiin ja useammin toistuviin tehohuippuihin.

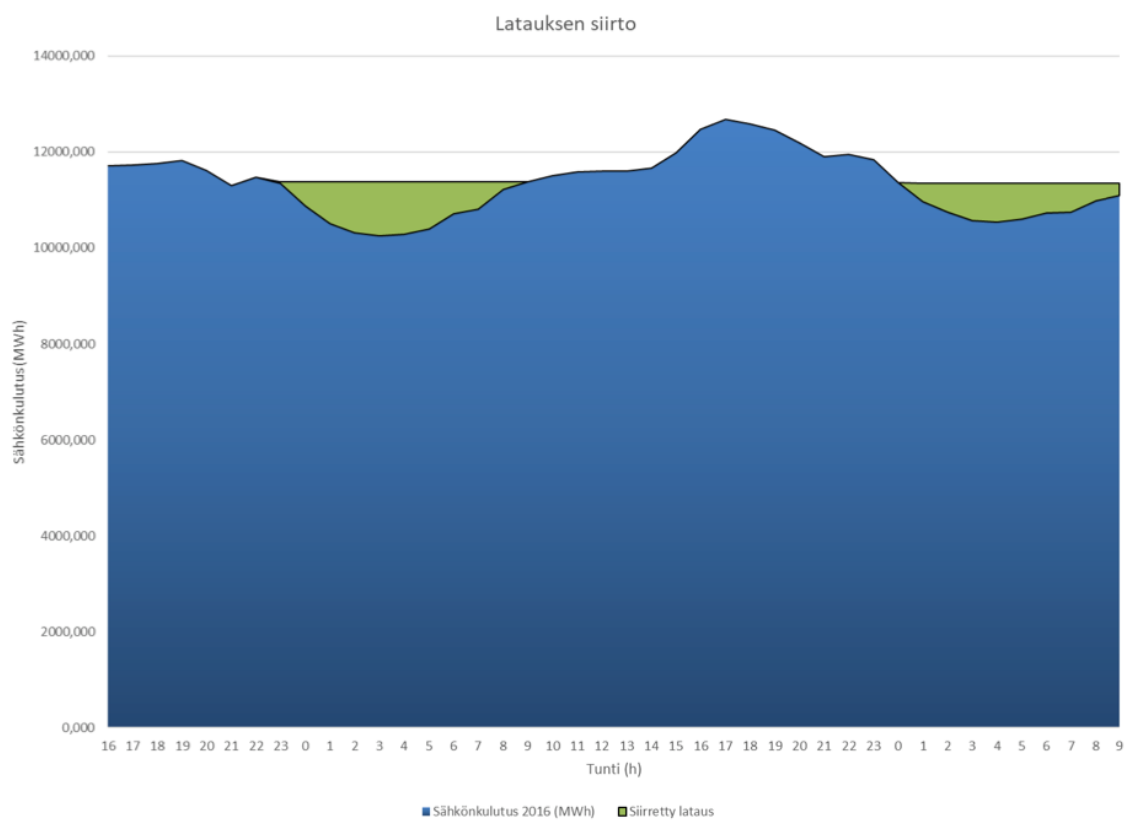
4.2 Latausaikojen ja lämpötilojen vaikutukset

Aikaisemmin on todettu latausaikojen ja lämpötilojen vaikuttavan kuormituksen vaihteluun. Sähköajoneuvojen latausajat ja lämpötilat ovat vaikuttavassa roolissa sähkönkulutukseen sähköisen liikenteen osalta. Tikkanen ja muut (2021) tekivät tutkimuksen, jossa he mittasivat eri autojen energiankulutuksen muutoksia lämpötilojen muuttuessa. Tutkimuksesta voi huomata lämpötilojen vaikutusten olevan suhteellisen suuria. Erityisesti kylmissä olosuhteissa pystyi havainnoimaan merkittäviä vaikutuksia. Kylmät sääolosuhteet vaikuttavat kulutettuun energiaan eri tapahtumien toimesta. Kylmällä säällä monet sähköajoneuvot lämmittävät akustoaan pidemmän elinkaaren saavuttamiseksi. Energiaa kuluu myös sisätilan lämmitykseen. Kylmä sää vaikuttaa hyötysuhteisiin, esimerkiksi talvella ladattaessa latureiden hyötysuhteet putoavat, ja samoin käy myös ajoneuvojen hyötysuhteille. Lataustapahtumat pidentyvät sekä lisääntyvät matalilla lämpötiloilla.

Latausajankohdat asettuvat usein iltapäiville, mikä näin ollen ohjaamattomana johtaa kasaantuvaan sähkönkulutukseen pahimpina huippukäyttöaikoina. Esimerkkiprofiili tilanteesta on esitetty kuvassa 4 (Kopsakangas-Savolainen ja Meriläinen 2018). Kuva 4 esittää havainnollistavasti latauksesta syntyvien tehohuippujen osumisen samaan aikaan muun sähkönkulutuksen kanssa. Tämä voi johtaa sähkön hinnan nousuun tehohuippujen aikajaksoissa kulutuksen vähentämisen toivossa. Nykyinen sähköverkko ei mahdollisesti ole riittävän joustava kaikilla yhteyksillä. Kopsakangas-Savolaisen ja Meriläisen (2018) mukaan tähän pystyy vaikuttamaan parantavasti älykkäillä latausvaihtoehdoilla. Älykkäällä latauksella pystyy ajoittamaan latauksen alkamaan ajanhetkellä, kun muu sähköverkon kuormitus on vähäisempää. Näin ollen huipputehot pysyisivät matalampina kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 4. Kontrolloimaton lataus (Kopsakangas-Savolainen ja Meriläinen 2018).



Kuva 5. Kontrolloitu lataus (Kopsakangas-Savolainen ja Meriläinen 2018).

4.3 Vaikutus sähköverkkoon

Kopsakangas-Savolaisen ja Meriläisen (2018) mukaan vaikutukset sähköverkkoon eivät ole pelkästään sähkönkulutuksen kasvuun tai ajoitukseen liittyviä ongelmia. Sähköajoneuvojen latauksista johtuvien tehohippujen vaikutukset sähköverkkoon voidaan jaotella jakelumuuntajiin, paikallisverkkoihin ja sähkönlaatuun vaikuttaviin vaikutuksiin. Vaikutukset sähkönlaatuun tarkoittaa lataustoimintojen mahdollisia vaikutuksia sähköverkkoon eli harmonisia yliaaltoja, välkyntää tai jännite-epäsymmetriaa (Alahäviälä, 2012). Monien asuinalueiden nykyinen sähköverkkoinfrastruktuuri ei välttämättä ole rakennettu huomioiden äkillistä kysynnän kasvua. Aluksi sähköajoneuvojen käyttöönotto saattaa painottua vahvasti tietyille alueille. Ruostesaaren ja muiden (2016) mukaan Suomessa on havaittu maaseuduilla ja harvaan asutuilla alueilla vähäistä halua hankkia sähköautoja mahdollisten lyhyiden kantamien vuoksi, verraten polttomoottoriautoihin. Sähköajoneuvojen lisääntyminen on ollut erityisen keskittynyttä Uudellamaalla, mikä on hyvä esimerkki paikallisverkkojen tarpeiden huomioon ottamisesta, sekä investointien tarpeesta paikallisten ongelmien välttämiseksi.

Sähköajoneuvojen lisääntyminen kuitenkin saattaa vaikuttaa maa- ja ilmakaapeleiden poikkipinta-alojen kasvattamiseen, sekä jakelumuuntajien kapasiteettien lisäämiseen. Alahäviälän (2012) mukaan pienetkin määrät sähköajoneuvoja voivat vaikuttaa keski- ja pienjänniteverkkoon, mikäli lataukset tapahtuisivat ilman ohjausta. Jakelumuuntajissa on mahdollista tapahtua epänormaalia kulumista liian suurien tehohippujen takia, mutta latauksesta johtuvan lisäkuormituksen ei uskota vaikuttavan jakelumuuntajien nimellistehon muutoksiin ainakaan suuressa mittakaavassa. Sähköajoneuvot ja niiden latausasemat ovat tulleet osaksi sähköverkkoa ja niiden lataamisesta saattaa tulla aiheutumaan haittoja, jos sitä ei tehdä ohjatusti. Nyt kuitenkin ei nähdä vielä suurempia huolia sähköverkon osalta.

5 Latausasemat

Latausasemien suunnittelu, asennus ja käyttö ovat ratkaisevan tärkeitä. Ne mahdollistavat suurempien asiakasvirtojen tehokkaan ja sulavan palvelun käytön (Yousuf ja muut, 2024). Seskon (2023) mukaan latausasemat voidaan tällä hetkellä jaotella kolmeen tyyppiin, jotka ovat hitaat-, perus- ja teholatausasemat. Näiden eri tyyppien välillä tehon tarjonta vaihtelee huomattavasti. Hitaat laturit tuottavat tehoa noin 3,7 kW ja ovat enimmäkseen käytössä kotitalouksissa. Niiden avulla sähköajoneuvon täyteen lataaminen voi kestää useita tunteja (Yousuf ja muut, 2024). Peruslaturit syöttävät kuitenkin tehoa noin 43 kW ja latausaika on lyhyempi, joten niitä voidaan käyttää julkisissa paikoissa kuten ostoskeskuksissa tai työpaikoilla (Yousuf ja muut, 2024).

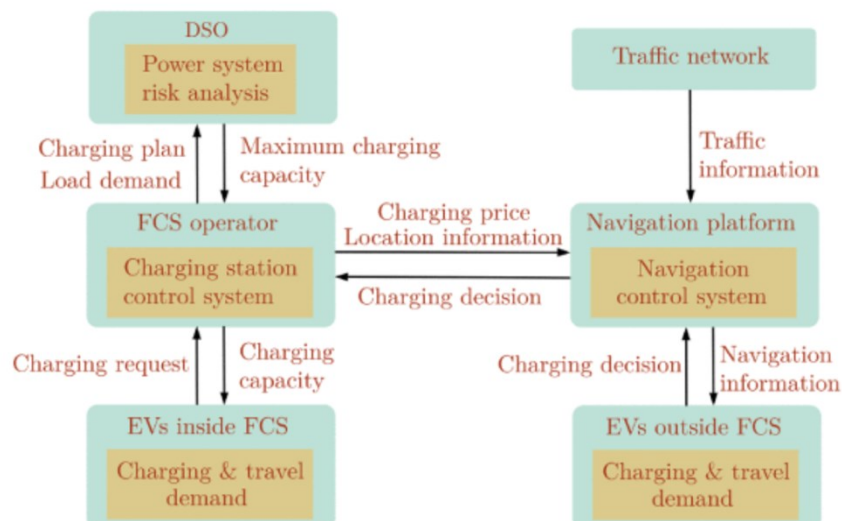
Sen sijaan teholatureiden latausteho on eri tilanteiden mukaan huomioiden noin 50 kW ja 350 kW välillä (Sesko, 2023). Yousufin ja muiden (2024) mukaan tällöin suurin osa akun kapasiteetista saadaan takaisin lyhyemmässä ajassa kuin muilla lataustyypeillä. Tämä on erityisen haluttua kaupunkien välisessä matkustamisessa ja latauspisteiden odotusaikojen välttämiseksi. Wangin ja muiden (2021) mukaan, vaikka pikalataus vähentää huomattavasti pitkiin latausaikoihin liittyvää ongelmaa, se muodostaa suuremman uhan verkon stabiiliudelle, koska se vaatii suuren määrän energiaa kerrallaan. Sen vuoksi latausinfrastruktuurin suunnittelu ja integrointi olisi tehtävä huolellisesti, jotta pikalatausteknologian käyttö voidaan maksimoida vaarantamatta sähköverkkojärjestelmien rajoitteita siirryttäessä kestävään sähköiseen liikennöintiin.

5.1 Älykkäät latausmahdollisuudet

Älykkäitä latausjärjestelmiä on erilaisia, jotka ovat ohjattavissa erilaisilla halutuilla tarpeilla. Tyhmäksi latausmenetelmäksi kutsutaan kontrolloimatonta latausmenetelmää eli kytkettäessä sähköajoneuvo latauspistokkeeseen alkaa se heti lataamaan akustoa ilman mitään ohjausta (Kopsakangas-Savolainen ja Meriläinen, 2018). Tikkasen (2024) mukaan älykkäät latausjärjestelmät käyttävät ohjaukseen eri signaaleja. Näitä signaaleita voivat olla verkkotaajuus, sähkönhinta eli SPOT-markkinat, tai muita markkinoista johdettuja

signaaleja. Näillä signaaleilla voi olla myös riski kasvattaa tehohuippuja. SPOT-markkinoilla ohjatut latausasemat saattavat esimerkiksi nostattaa paikallisia tehohuippuja, mikä voi päästä myös vaikuttamaan korkeammille jännitetasoille. Tämän takia on oleellista pystyä ohjamaan eri signaaleilla. Tikkasen ja muiden (2021) mukaan yhtenä kuormanhallinnan ohjauksen menetelmänä voidaan käyttää dynaamista kuormanohjausta. Dynaamisella kuormanohjauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa kuormaa hallitaan sen mukaan, kuinka moni latauspistoke on käytössä. Dynaaminen kuormanohjaus ei koskaan ylitä sille asetettua raja-arvoa. Se syöttää virtaa ohjatusti kaikille käytössä oleville latu-reille vapaana olevan kapasiteetin mukaan.

Perinteisellä tyylillä älykäs latausstrategia tapahtuu, kun sähköajoneuvoa ladataan matalatehoisesta kotitalouspistokkeesta yön yli. Yöllä tapahtuvan latauksen vaikutukset ovat vähäisempiä sähköverkolle, sillä silloin energiankulutus, kuten jo aikaisemmin todettiin, on vähäisempää. Päivällä tapahtuviin latauksiin käytetään usein julkisia latureita ja niissä ei ole samankaltaista yö-latausmahdollisuutta. Wang ja muut (2021) tekivät tutkimusta ohjatuista latausprosesseista. Kuvan 6 ohjauskaavio on heidän tutkimuksestaan paremman sähköverkon vakauden saavuttamiseksi. Tässä ohjauskaaviossa tarkoituksena on saada kuluttajat käyttämään pikalatureita ruuhka-ajan ulkopuolella. Näin ollen jakeluverkkojen haltijoilla olisi mahdollisuus ohjata kuljettajia lataushinnaston sekä saatavilla olevan lataustehon avulla. Tätä lähestymistapaa he ovat tutkineet simuloimalla, ja tulokset ovat olleet positiivisia huippukuormitusten aiheuttamiin haasteisiin. Tämä ohjausmenetelmä voisi mahdollistaa myös taloudellisen hyödyn kuluttajille sekä palveluiden tarjoajille.



Kuva 6. Ohjauskaavio pikalatureihin (Wang ja muut 2021).

5.2 Verkkoliittymät

Wangin ja muiden (2021) mukaan latausasemilla verkkoliittymät määrittävät suoraan, kuinka paljon niillä on kykyä syöttää energiaa. Latausasemat, erityisesti julkiset latausasemat, tarvitsevat usein suuren verkkoliittännän. Tämän avulla latausasemat pystyvät purkamaan useiden sähköajoneuvojen nopean lataustarpeen samanaikaisesti, jotta pyrittäisiin välttämään liiallisten tehuippujen esiintyminen suurten liikennemäärien aikana. Hetkellisten tehontarpeiden hallinta on keskeisessä roolissa, mikä vähentää riskejä ylikuormitustilanteisiin. Kuormanhallintastrategiat, kuten kysyntäjousto-ohjelmat ja dynaamiset kuormanhallinnat, voivat vähentää latausasemista johtuvia kuormituksien vaikutuksia sähköverkossa merkittävästi (Wang ja muut 2021).

5.3 Kustannustehokkuus

Sähköajoneuvoista johtuvat lisääntyvät energiantarpeet voivat aiheuttaa kustannuksia. Tässä luvussa käsitellään mahdollisia kustannuspuolia, jotka liittyvät sähköverkon päivittämiseen. Näin ollen perehdytään sähköverkkoihin ja älykkäisiin latausratkaisuihin, joilla pyritään hallitsemaan liiallisia tehohippuja.

Sähköajoneuvojen lisääntyessä ja kasvavan energiantarpeen noustessa edellyttää se parannuksia sähköinfrastruktuurille, selviää Sagoon ja muiden (2019) artikkelista. Nämä kyseiset parannukset tulisivat koskemaan siirtojohtoja, sähköasemia ja älykkäitä latausratkaisuja. Siirtojakeluverkkojen ja sähköasemien parantaminen on hintavaa. Erityisesti korkeammalla jännitetasolla siitä tulee kalliimpaa, sillä korkeamman jännitetaso laitteistot ovat kalliimpia (Tiainen, 2011). Mahdollista on myös joutua jopa rakentamaan uusia siirtojohtoja sekä sähköasemia, mikä tulisi maksamaan vieläkin enemmän. Näiden uusien sähköasemien, sekä siirtoverkkojen rakentamisen riskiä on mahdollista välttää ohjatulla latauksella. Ohjatuilla latauksilla olisi myös mahdollista vähentää tarvetta uusille sähköntuotantoinvestoinneille. Optimoitujen latauksien lisääminen maksaa myös, mutta niillä on mahdollisuus vähentää kuluja (North energy solutions, 2024).

6 Pohdinta

Tällä hetkellä on useita erilaisia lataustapoja, jotka vaikuttavat eri tavoin kuormitukseen. Kuormituksen hallintaan tarvitaan älykkäitä latausmenetelmiä, jotka mahdollistavat parempaa sähköverkon vakautta.

Sähköverkon laadun ylläpitämiseksi tarvitaan parantavia toimenpiteitä kasvavan sähkönkulutuksen ennusteen myötä. Tämä tarkoittaa, että sähköajoneuvojen latauksen pitäisi tapahtua hallitusti välttääkseen liiallista samanaikaisuutta. Hetkiä, jolloin riski samanaikaisuuksille tapahtuu helpoimmin ovat noin aamu yhdeksän ja ilta yhdentoista välillä. Näiden riskien vaikutukset tulisivat ennusteiden mukaan vaikuttamaan ensiksi paikallisesti. Paikallisverkkojen muuntajat ja siirtojohdot olisivat mahdollisia ensimmäisiä pulonkauloja. Näiden paikallisverkkojen ylikuormitusta halutaan välttää, sillä korjaustoimenpiteet maksavat aina. Riski saattaa myös lisäksi nousta paikallisverkoista korkeampiin jännitteenjakeleihin.

Sähköverkon luotettavuuden parantamiseksi tulevaisuudessa edesauttaa älykkäät latausmahdollisuudet. Dynaamisella kuormanohjauksella pystytään ratkaisemaan liiallisten tehohuippujen syntyminen pienemmissä verkkoympäristöissä kuten esimerkiksi kerrostalossa. Tämä ei kuitenkaan pelkästään pysty takaamaan luotettavuutta isommin tarkastellussa sähköverkossa, kuten asuinalueen jakeluverkossa. Kyvyllä tarkastella asuinalueen paikallisverkon kulutusta ja tämän avulla ohjata kaikkia alueen latureita pystyisi välttämään liiallisia samanaikaisia latauksia. Tämä tietysti vaatii investointeja yksityishenkilöiltäkin, sillä laitteiden pitäisi olla yhteensopivia keskenään. Halutaanko tämän kaltaiseen asiaan sijoittaa omaisuutta, sillä lataamaan pystyy ilman älykkäitä latausratkaisuja? Tähän asiaan voisi pystyä vaikuttamaan jakeluverkonhaltija manipuloimalla sähkön hintaa ja tarjoamalla mahdollisesti edullisempaa sähköä oikeina lataushetkinä. Tässä on tärkeää huomioida, että sähkönhinnan ohjaus tapahtuisi alueellisesti eikä esimerkiksi SPOT-markkinoiden tapaan. Tällä voisi olla jollakin tasolla vaikutusta ihmisten latauskäytäytymiseen. Tällä hetkellä on käytössä älykkäitä latausratkaisuja, jotka ohjaavat latausta

sähköhinnan mukaan. Tämä kuitenkin tulisi hankalammaksi tulevaisuudessa sähköajoneuvojen määrän lisääntymisen myötä. Sähkön hinnan mukaan ohjautuvat laturit tarkastelevat pelkästään sähköhintaa välittämättä jakeluverkon kuormituksesta. Lataus käynnistyy, kun hinta on raja-arvon alapuolella. Tämä tarkoittaisi isommassa jakelupiirissä äkillistä kuormitusta, sillä jokaisen laturin kytkeydyttyä samanaikaisesti nousisi asuinalueella kuormitus sähköajoneuvojen osalta korkealle. Lisäksi korostuu riski ylikuormitukselle, jos asuinalueella on jo valmiiksi huippukulutushetki.

7 Yhteenveto

Ilmastonmuutoksen myötä sähköajoneuvojen lisääntyminen on keskeisessä roolissa. Polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot ovat omalta osaltaan lisänneet päästöjä, ja yhtenä vaihtoehtoisena ratkaisuna ovat sähköajoneuvot. Sähköajoneuvojen lisääntyessä, sähkön tarve lisääntyy, minkä vuoksi tämänhetkinen sähköverkkoinfrastruktuuri saattaa kohdata haasteita sähkönjakelussa. Asuinalueiden paikallisiin ja alueellisiin sähkönjakeluverkkoihin on muodostumassa kuormitusta kasvavan kysynnän myötä. Tämä korostuu etenkin kylminä talviaikoina, sillä matalat lämpötilat lisäävät energiantarvetta. Energiantarpeen kysynnän kasvaessa, riski samanaikaisuuksille kasvaa. Kun kuormitus kasvaa liian suureksi samalla ajan hetkellä, se aiheuttaa tehohuippuja. Jos verkolla ei ole tarpeeksi joustavuutta, se ylikuormittuu ja voi johtaa heikkoon sähkönlaatuun. Tutkimuksen päättävänä oli tutkia sähköajoneuvojen latauksista syntyviä tehohuippuja ja niiden vähentämistä.

Sähköajoneuvojen määrästä tulevaisuudessa on tehty erilaisia arvioita. Arvioiden mukaan ladattavien hybridien ja sähköautojen määrä on nykyisestä yli kolminkertaistumassa vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2030 sähköautojen ja ladattavien hybridien yhteenlasketun energiantarpeen arvioidaan olevan noin 2,31 TWh vuodessa. Tämä perustuu sähköautojen kuukausikulutuksen ja ladattavien hybridien arvioidun kuukausikulutuksen laskelmiin, joissa sähköllä ajettavien kilometrien osuvuudeksi on oletettu 60 %. Sähköajoneuvojen lisääntymisestä on käsitelty eri skenaarioita, jotka olivat perusskenaario ja korkean kiinnostuksen skenaario. Perusskenaarion mukaan Suomessa tulisi olemaan noin 750 tuhatta sähköajoneuvoa vuonna 2030, kun taas korkeimman kasvun omaavassa skenaariossa määrä tulisi olemaan 1,3 miljoona. Tähän määrään sisältyy ladattavat hybridit ja täyssähköautot.

Samanaikaisten latausten määrän kasvu lisää riskiä tehohuippujen kasvulle kaiken muun kulutuksen lisäksi. Latauksien lisääntymisen aiheuttamat tehohuiput syntyvät eksponentiaalisesti. Talvikuukausina latausprosessi kuluttaa enemmän energiaa ja akustot syövät enemmän energiaa. Latausajoilla sekä lämpötilalla on vaikutus sähkönkysyntään.

Sähköajoneuvojen määrän nousu näyttää ainakin aluksi painottuvan eri maantieteellisille alueille vahvemmin kuin toisille. Alueiden, joille painottuu suurempi kasvu, jakeluverkkojen toimintakykyä tulee tarkastella. Sähköajoneuvojen latauksesta muodostuvien mahdollisten tehohuippujen odotetaan vaikuttavan ensimmäisenä paikallisiin jakeluverkkoihin. Tehohuipuilla voi olla vaikutusta myös sähkönlaatuun. Tällä hetkellä uskotaan jakeluverkkoihin kohdistuvan vaikutuksen olevan tulevaisuudessa vähäistä Suomessa.

Älykkäät latausratkaisut ovat avainasemassa sähköverkon luotettavuuden parantamisessa. Älykkäät latausratkaisut pohjautuvat signaali-ohjattuihin menetelmiin, jotka ohjaavat latausta asetetuilla sisääntuloarvoilla. Yksi älykäs latausratkaisu on dynaaminen kuormanohjaus. Se jakaa käytettävissä olevan energian tasaisesti kaikille käytössä oleville latauslaitteille, eikä ylitä sille asetettua raja-arvoa. Vastakohta älykkäälle latausjärjestelmälle on kontrolloimaton latausjärjestelmä. Kontrolloimattomassa latausjärjestelmässä kytkettäessä sähköajoneuvo latauspistokkeeseen, sähköajoneuvo alkaa latautua heti ilman ohjausta. Kontrolloimattomalla latausjärjestelmällä ladatessa on suositeltavaa käyttää yöllistä lataustapaa, sillä näin se ajoittuu sähköverkon energiankulutuksen huippukäyttöaikojen ulkopuolelle.

Sähköajoneuvojen lisääntyminen ja energiantarpeen kasvaminen voivat vaatia parannuksia sähköinfrastruktuurille. Sähköasemien ja siirtojakeluverkkojen parantaminen on kallista, erityisesti korkeammalla jännitetasolla. Uusien sähköasemien ja siirtojohtojen rakentamisriskiä voidaan pienentää ohjatulla latauksella. Älykkäillä latausjärjestelmillä on kustannuksia, mutta niiden eduilla on mahdollista saada vähennettyä kuluja.

Lähteet

- Alahäivälä, A. (2012). *Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin* [diplomityö, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc. Noudettu 15.10.2024 osoitteesta <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/7b932d0a-6d24-47a8-b756-bea62a0da615/content>
- Aoun, A., Adda, M., Ilinca, A., Ghandour, M., & Ibrahim, H. (2024). Dynamic Charging Optimization Algorithm for Electric Vehicles to Mitigate Grid Power Peaks. *World Electric Vehicle Journal*, 15(7), 324. <https://doi.org/10.3390/wevj15070324>
- Deltrix. (n,d.). *Charging Modes*. Deltrix charging solutions. Noudettu 6.11.2024 osoitteesta <https://deltrixchargers.com/about-emobility/charging-modes/>
- Haakana, A., Laurikko, J., Granström, R., & Hagman, R. (2013, 13. joulukuuta). *Assessing range and performance of electric vehicles in nordic driving conditions –project final report*. Noudettu 20.9.2024 osoitteesta <https://gnf.fi/wp-content/uploads/2016/05/RekkEVIDde.pdf>
- Haakana, J. (2021, 9. heinäkuuta). *Sähköverkon käyttöä voi tehostaa joustoilla*. Lut. Noudettu 8.10.2024 osoitteesta <https://www.lut.fi/fi/uutiset/sahkoverkon-kayttoa-voi-tehostaa-joustoilla>
- Kopsakangas-Savolainen, M., & Meriläinen, T. (2018, 17. elokuuta). *Sähköautoilun sähkömarkkina-ajurit ja hajautettu varastointi*. Ilmastopaneeli. Noudettu 16.10.2024 osoitteesta https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2024/07/IP_Sahkoautoistumisen-ajurit_sahkomarkkina_.pdf
- Laukkanen, J. (2023, 13. joulukuuta). *Akustot ja muut energiavarastot välttämätön osuus uusiutuvan energian tehokasta käyttöä*. Sweco. Noudettu 17.9.2024 osoitteesta <https://www.sweco.fi/blog/akustot-energian-varastointiin/>
- Mikkonen. (2024, 23. toukokuuta). *Ennuste: Näin monta täyssähköautoa on Suomessa vuonna 2030 – tietyt seikat edistävät ilmiötä*. Mtv. Noudettu 10.11.2024 osoitteesta <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/ennuste-nain-monta-tayssahkoautoa-on-suomessa-vuonna-2030-tietyt-seikat-edistavat-ilmiota/8943572-gs.dz8msl>
- North energy solutions. (2024, 28. elokuuta). *Sähköauton latausjärjestelmän integrointi älykkäisiin energiaratkaisuihin*. Noudettu 15.10.2024 osoitteesta

<https://www.northenergy.fi/sahkoauton-latausjarjestelman-integrointi-alykkai-siin-energiaratkaisuihin/>

- Ruostesaari, I., Aalto, P., Kallioharju, K., Kojo, M., Rautiainen, A., & Toivanen, P. (2016, marraskuu). *Suomalaiset eivät lämpene sähköautoille – miten kiinnostus sytytetään?* El-tran. Noudettu 15.10.2024 osoitteesta https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100686/suomalaiset_eivat_lampene_sahkoautoille.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sahoo, A., Mistry, K., Baker, T. (2019, 20. joulukuuta). *The costs of revving up the grid for electric vehicles.* Bcg. Noudettu 8.11.2024 osoitteesta <https://www.bcg.com/publications/2019/costs-revving-up-the-grid-for-electric-vehicles>
- Scanoffice. (n,d.). *Sähköauton lataus -sanasto.* Scanoffice. Noudettu 20.11.2024 osoitteesta <https://scanoffice.fi/sahkoauton-latausasemat/opas/ohjeet-ja-vinkit-sahkoauton-lataukseen/sahkoauton-lataus-sanasto/>
- Sesko. (2023). *Sähköajoneuvojen lataussuositus.* Noudettu 20.10.2024 osoitteesta <https://sesko.fi/standardointi/sahkoautot-ja-latausjarjestelmat/lataussuositus/>
- Shan, J., Lei, W., Ning, J., Wei, W., & Huan, Y. (2016, October). Research on factors that influence the charging load of Electric Vehicles and modeling of the load. In *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* (pp. 1412-1415). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867446>
- Tekniikanmaailma. (2023, 2. lokakuuta). *Milloin sähköautojen määrä ylittää bensa-autojen määrän Suomessa? Traficomin uusi ennuste kertoo tarkan haarukan.* Noudettu 8.9.2024 osoitteesta <https://tekniikanmaailma.fi/milloin-sahkoautojen-maara-ylittaa-bensa-autojen-maaran-suomessa-trafficomin-uusi-ennuste-kerto-tarkan-haarukan/>
- Teknologiaeollisuus. (2024, 23. lokakuuta). *Suomi sähköisen liikenteen edelläkävijä vuonna 2030.* Noudettu 25.10.2024 osoitteesta <https://teknologiaeollisuus.fi/emobility/tietoa-toimialasta/sahkoinen-liikenne-2030/>

- Tiainen, T. (2011). *Sähkönjakeluverkon sap-laitehierarkia* [opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28015/Tiainen_Teemu.pdf?sequence=1
- Tikanen, V. (2024). *ON LOAD MODELING OF ELECTRIC VEHICLES—ENERGY SYSTEM VIEWPOINTS* [väitöskirja, Lappeenranta-Lahti teknillinen yliopisto]. Lutpub. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166753/Ville_Tikka_A4.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tikka, V., Kalenius, J., Räisänen, O., & Lassila, J. (2021, lokakuussa). *Loppuraportti: Sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitusteho erilaisissa toimintaympäristöissä*. Energiateollisuus. https://energia.fi/wp-content/uploads/2021/11/Sahkoautojen_latauksen_muodostama_kuormitus-ja_mitoitusteho_erilaisissa_toimintaymparistoissa.pdf
- Tilastokeskus. (2024). *Supply and total consumption of electricity, 2023*. Noudettu 26.11.2024 osoitteesta https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia_en.html
- Tirronen, I. (2024). *Sähköajoneuvojen vaikutukset sähköverkkoon haja-asutusalueilla* [diplomityö, Lappeenranta-Lahti teknillinen yliopisto]. Lutpub. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/167146/Diplomity%F6_Ismo_Tirronen.pdf;jsessionid=ECB05E6321FC5B2EB4F8535480A1455D?sequence=1
- Torriti, J. (2015). *Peak energy demand and demand side response*. Routledge.
- Valtionneuvosto. (2023). *Hallituksen keskeiset ilmastotoimet ja saavutukset*. Noudettu 25.11.2024 osoitteesta <https://ym.fi/documents/1410903/42733401/Hallituksen+ilmastotoimia+ja+saavutuksia.pdf/b41971d4-4222-71aa-feec-b09ed1ad7726/Hallituksen+ilmastotoimia+ja+saavutuksia.pdf?t=1678974218319>
- Viri, R., & Mäkinen, J. (2024). EV-share development: speed vs interest to adopt. *European Transport Research Review*, 16(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00637-1>
- Virta. (2018). *Sähköauton kulutus – Kuinka paljon energiaa sähköauto käyttää vuodessa?* Virta global. Noudettu 4.9.2024 osoitteesta <https://www.virta.global/fi/blogi/sahkoauton-kulutus-kuinka-paljon-sahkoauto-kuluttaa-vuodessa>

- Wang, L., Qin, Z., Slangen, T., Bauer, P., & Van Wijk, T. (2021). Grid impact of electric vehicle fast charging stations: Trends, standards, issues and mitigation measures—an overview. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2, 56-74. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2021.3054601>
- Yousuf, A. K. M., Wang, Z., Paranjape, R., & Tang, Y. (2024). An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: a comprehensive review of challenges, mitigation approaches, and optimization strategies. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385731>