



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jeremie Akili

Sähköautojen latausasemien vaikutus kaupunkiverkon kuormitukseen

Tekniikan ja
innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Energia- ja informaatiotekniikan
ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Jeremie Akili
Tutkielman nimi:	Sähköautojen latausasemien vaikutus kaupunkiverkon kuormitukseen
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka
Työn ohjaaja:	Anne Mäkiranta
Valmistumisvuosi:	2026 Sivumäärä:39

TIIVISTELMÄ:

Sähköautojen odotetaan yleistyvän tulevina vuosina, mikä aiheuttaa haasteita jakeluverkkojen näkökulmasta. Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmällä, miten sähköautojen lataus vaikuttaa jakeluverkkojen toimintaan, ja arvioidaan koordinoitun latauksen mahdollisuuksia näiden ongelmien lieventämisessä.

Aihe on ajankohtainen, koska lisääntyvät sähköautot tuovat dynaamisia kuormia verkkoon, joiden mallintamista ei voida tehdä perinteisin keinoin, sillä kuormat eivät ole paikkariippuvaisia ja niiden toiminta riippuu täysin sähköauton käyttäjän käytöksestä.

Työssä esitellään ensin taustatiedot, joissa käsitellään autojen lataustekniikat, latausmoodit ja menetelmät sekä kuvataan jakeluverkon rakenne ja toimintaperiaatteet. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan ensin koordinoitumattoman latauksen vaikutuksia kuormitusprofiileihin, jännitteen laatuun ja tehohäviöihin. Jonka jälkeen käsitellään mahdolliset muutokset jakeluverkon arkkitehtuuriin ja lopuksi vertaillaan koordinoitun latauksen muotoja, kuten V2G-tekniikkaa, kysynnänohjausta sekä latausasemien sijoittelun optimointia.

Koordinoimaton lataus kasaantuu iltapäivälle huippukysynnän päälle, aiheuttaen jännitealenemaa, muuntajien lämpöylikuormitusta ja tehohäviöitä. Kun sähköautojen osuus kaikista autoista on noin neljännes, jakeluverkot saattavat kokea ylikuormitusta. Pohjoismaissa kylmät talvet pahentavat tilannetta entisestään

Koordinoitun latauksen kohdalla huomattiin, että älylataus itsessään ei ratkaise verkon ongelmia. Portaittaiset TOU-tariffit voivat pahentaa huippukuormitusta, kytkemällä kaikki odottavat sähköautot verkkoon samanaikaisesti hinnan laskiessa. Dynaamiset tariffit osoittautuvat tehokkaimmiksi ratkaisuksi. V2G-tekniikkaa haastaa akun kulumisen ja epäselvät kannustimet.

Tutkielman johtopäätöksenä todetaan, että koordinoimaton lataus kuormittaa jakeluverkkoa merkittävästi, mutta koordinoitun latauksen ja dynaamisella kuormanhallinnalla voidaan lieventää haittoja huomattavasti. Tehokkaimmat ratkaisut hyödyntävät sähköautoja aktiivisina verkon resursseina passiivisten kuormien sijaan. Lisätutkimusta tarvitaan erityisesti pohjoismaisten lämpötilaolosuhteiden vaikutuksista sähköverkon suunnitteluun ja mitoitukseen, reaaliaikaisten mittausjärjestelmien kehittämisestä sekä raskaan liikenteen sähköistymisen vaikutusten eroista suhteessa henkilöautoliikenteen sähköistymiseen.

AVAINSANAT: sähköautot, jakeluverkko, tariffit, koordinoitu ja koordinoimaton lataus, kuormitusprofiili, huippukuorma, V2G, jännitteen laatu

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Taustaa	8
1.2	Tutkielman tavoitteet ja tutkimusmenetelmä	8
2	Sähköautojen lataus ja jakeluverkon toimintaperiaatteet	9
2.1	Sähköautojen lataustekniikat	10
2.1.1	Latausmoodit	10
2.1.2	Latausmenetelmät	11
2.2	Jakeluverkkojen rakenne	12
2.3	Sähkönkulutuksen kuormitusprofiilit	14
3	Sähköautojen latauksen vaikutukset jakeluverkkoon	15
3.1	Koordinoimattoman latauksen vaikutukset jakeluverkkoon	16
3.1.1	Vaikutukset kuormitusprofiileihin ja huippukuormaan	18
3.1.2	Vaikutukset jakeluverkon toimintaan	20
3.2	Jakeluverkon vahvistaminen ja infrastruktuuriin investoinnit	21
3.2.1	Rakenteelliset muutostarpeet	22
3.2.2	Investointistrategiat	23
3.3	Koordinoitu lataus ja älykkäät ratkaisut	23
3.3.1	Älylataus ja kysynnänohjaus	24
3.3.2	V2G-teknologia ja kaksisuuntainen tehonsiirto	26
3.3.3	Latausasemien optimaalinen sijoittelu	29
4	Tulokset	30
5	Johtopäätökset	32
6	Yhteenveto	34

Liite	39
Liite Kodinkoneiden sähkönkulutus vuositasolla (Helen)	39

Kuvat

Kuva 1. Kasvihuonekaasujen suhde EU:n talouteen ja BKT:hen , Q4 2022 - Q4 2025.	7
Kuva 2. Sähköautojen luokittelu voimankäyttötekniikan perusteella.	9
Kuva 3. Esimerkki sähköjakeluverkosta.	14
Kuva 4. Sähköautojen latausosuudet sijainnin mukaan.	17
Kuva 5. Ajoneuvojen saapumisaikajakauma Pohjois-Amerikassa.	18
Kuva 6. Syöttöjohdon kuormitusprofiili RBTS-simuloinnissa.	19
Kuva 7. Syöttöjohdon simulointi El-Shoroukin simuloinnissa.	19
Kuva 8. Kotitalouksien huippukysynnän kasvu sähköautojen käyttöönoton tason mukaan.	25
Kuva 9. Esimerkki huippukulutuksen leikkaamiseen tarvittavan energian vaikutuksesta.	28

Lyhenteet

A	Ampeeri
AC	Alternating current, vaihtovirta
AMI	Advanced metering infrastructure
APL	Average Load Profile
BEV	Battery electric vehicles,
CC-CV	Constant current-constant voltage, vakio- virta-vakiojännite
CCS	Combined Charging System
DC	Direct current, tasavirta
EPRI	The Electric Power Research Institute
ER-EV	Extended range electric vehicles,
EU	Euroopan unioni

FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle,
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Dis- turbances
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Nor- mal operation
FFR	Fast Frequency Reserve
HEV	Hybrid electric vehicles,
IEA	International Energy Agency
IEC	The International Electrotechnical Commission
IoT	Internet of Things
kW	Kilowatti
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicles
RBTS	Roy Billinton Test System
SAE	Society of Automotive Engineers
SCADA	Supervisory control and data acquisition
SFP	Stochastic Fluctuation Profile
SLP	Standard Load Profile
SPOT	Spot price
TOU	Time-of-use
V	Voltti
V2G	Vehicle to Grid

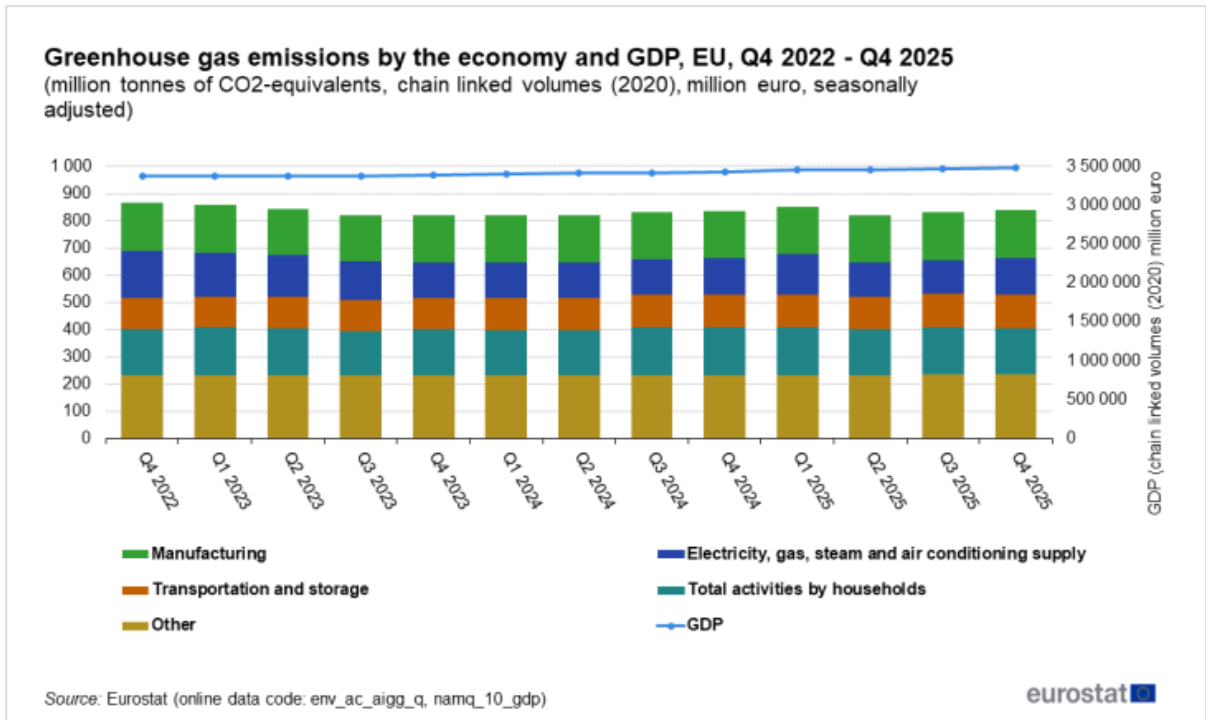
Tekoälyn käyttöä koskeva ilmoitus

Tämän kandidaatintutkielman valmistelun aikana tutkielman tekijä Jeremie Akili käytti Claude Opus -tekoälyä työkaluna opinnäytteensä rakenteen ideoimiseen ja kielen kehittämiseen. Clauden käytön jälkeen tekijä on tarkistanut ja muokannut sisältöä ja ottaa täyden vastuun kandidaatintutkielman sisällöstä.

1 Johdanto

Sähköautot tulevat lisääntymään tulevina vuosina. Kansainvälisen energiaviraston IEA:n mukaan yli 20 % kaikista maailmanlaajuisesti myydyistä uusista autoista on sähköautoja. Sähköautoja myytiin 17 miljoonaa maailmanlaajuisesti vuonna 2024, mikä on 25 %:n nousu edeltävään vuoteen verrattuna. Euroopassa 14 EU:n jäsenvaltiossa koettiin sähköautoissa nouseva markkinaosuus. (International Energy Agency, 2025, ss. 15-16).

Muutosta ajaa ihmisten suhtautuminen ilmastonmuutokseen. Perinteiset polttomoottorivetoiset autot saastuttavat ilmaa fossiilisilla päästöillä, kuten typen oksideilla ja hiilidioksidilla. 28 % EU:n hiilidioksidipäästöistä aiheutuu liikenne sektorista ja maantieliikenteen osuus on 70 % niistä päästöistä (Sanguesa;Torres-Sanz;Garrido;Martinez;& Marquez-Barja, 2021, s. 1). Kuvassa 1 näkyy EU:n julkaisema data eri sektoreiden kasvihuonekaasupäästöistä. Kuvasta voidaan päätellä, että liikenne on yksi suurimmista kasvihuonekaasujen tuottajista EU:ssa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi eri hallitukset ympäri maailmaa ovat ottaneet käyttöön erilaisia kannustimia sähköisen liikenteen edistämiseksi. Näitä kannustimia ovat verohyvitykset, alennukset, alennetut rekisteröintimaksut ja pääsy bussikaistoille sähköautoilla. Valtioiden asettamat päästörajoitukset ja polttoainetehokkuusstandardit ovat kannustaneet autonvalmistajia investoimaan sähköautoteknologiaan ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi (Tikka, 2024, s. 29)



Kuva 1. Kasvihuonekaasujen suhde EU:n talouteen ja BKT:hen , Q4 2022 - Q4 2025 (Eurostat, 2026).

Vaikka sähköautoilla pystytään ehkäisemään fossiilisista päästöistä aiheutuvaa haittaa, ne tuovat mukanaan uusia haasteita jakeluverkoissa. Sähköautoa voidaan ladata koti olosuhteissa jopa 3–20 kW teholla riippuen latausmoodista (Mastoi, ym., 2022, s. 11507) . Tällainen latausteho voi moninkertaistaa kotitalouden hetkellisen sähkönkulutuksen. Koska kotilataus tapahtuu usein iltapäivän ja illan huippukulutuksen aikana, se kasvattaa sähkön kysyntää entisestään ja voi johtaa paikallisten jakeluverkkojen ylikuormittumiseen.

1.1 Taustaa

Sähköautojen kuormien dynaamisen luonteen vuoksi loppukäyttäjien sähkönkulutus tulee olemaan tulevaisuudessa yhä vaikeampaa ennustaa. Kuormitusennusteita on tehty suhteellisen vanhoilla menetelmillä, ja nyt liikenteen nopea muutos on asettanut paineita menetelmien päivittämiseen. (Tikka, 2024, s. 65) Tämän haasteen ratkaisemiseen on tutkittu kahta näkökulmaa: jakeluverkkoinfrastruktuuriin tarvittavia investointeja ja älylatausta. Älylataus voi joissain tapauksissa pahentaa verkon kuormitusta. Esimerkiksi porrastettujen tariffien menetelmän on huomattu lisäävän kuormituksen synkronointia siirtämällä kuormitusta ajanjaksoihin, jolloin useammat autot ovat kytkettyinä ja odottamassa latausta (Daneshzand;Coker;Potter;& Smith, 2023, s. 10). Lisäksi infrastruktuurin saatavuudella ja laadulla on keskeinen rooli sähköautomarkkinoiden kasvussa. IEA suosittelee kansallisen tason infrastruktuurisuunnittelua, latauksenajoitusalgoritmien standardisoimista, kapasiteettiennusteiden ja transientti- sekä vakiotilasuurituskyvyn analyysin kehittämistä V2G-tekniikan mallintamiseen (Ibrahim;Gaber;& ZakZouk, 2024, s. 12).

1.2 Tutkielman tavoitteet ja tutkimusmenetelmä

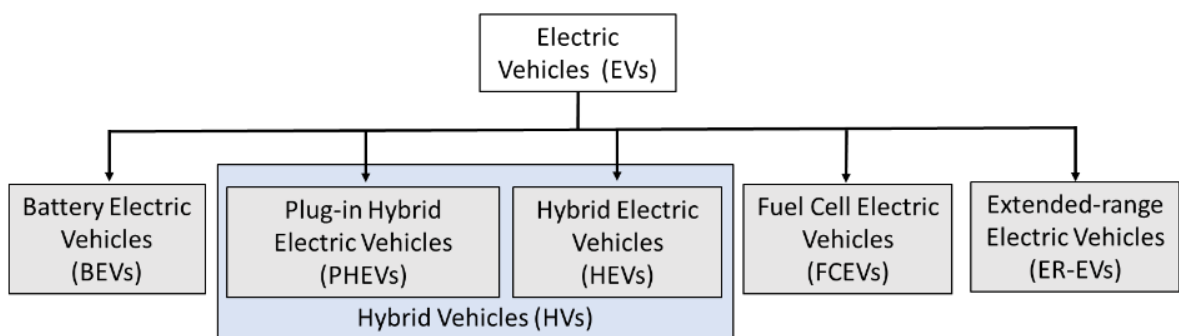
Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan koordinoimattoman latauksen aiheuttamia ongelmia, esitellään jakeluverkkoon tarvittavia investointeja ja esitellään sen jälkeen älykkään latauksen tuomia ratkaisuja. Tutkielman tavoitteena on vertailla eri lataushallinnan tekniikoita ja niiden vaikutuksia jakeluverkkojen kuormitusprofiileihin.

Tutkielma toteutetaan systemaattisena kirjallisuuskatsauksena, jonka tarkoituksena on koota tiivistelmiä saman aihepiirin aiempien tutkimusten olennaisesta sisällöstä. ”Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on tehokas tapa testata hypoteeseja, esittää tutkimusten tuloksia tiiviissä muodossa sekä arvioida niiden johdonmukaisuutta. Se voi paljastaa aikaisemmassa tutkimuksessa esiintyvät puutteet eli tuoda esiin uusia tutkimustarpeita” (Salminen, 2011, s. 9).

2 Sähköautojen lataus ja jakeluverkon toimintaperiaatteet

Sähköautot voidaan luokitella eri kategorioihin niiden käyttämän voimansiirtotekniikan perusteella. Yleisimpiä sähköautotyyppjä ovat täyssähköautot (BEV), ladattavat hybridautot (PHEV), hybridautot (HEV) sekä laajennetun toimintasäteen täyssähköautot (ER-EV), jotka ovat pienellä polttomoottorilla varustettuja täyssähköautoja. Polttomoottori toimii generaattorina, joka lataa akkua ajon aikana, mikä pidentää toimintamatkaa. Vetypolttokennosähköautot (FCEV) luokitellaan myös sähköautoiksi, mutta niitä ei tutkita, koska ne eivät ole ladattavia autoja. Vetyautoilla ei ole merkittävää vaikutusta sähkö infrastruktuuriin ja energia markkinoihin (Sanguesa;Torres-Sanz;Garrido;Martinez;& Marquez-Barja, 2021, ss. 276-377) (Tikka, 2024, s. 30).

Sanguesa & muiden (2021, s. 377) mukaan täyssähköautot toimivat yksinomaan sähköllä ilman minkäänlaista polttomoottoria. Akku varastoi energiaa ja ajoneuvon toimintasäde määräytyy akun kapasiteetin mukaan. Hybridautot taas liikkuvat polttomoottorin ja sähkömoottorin avulla, mikä vähentää polttoaineen tarvetta normaalin ajon aikana. Polttomoottorin tuottamasta energiasta osa käytetään sähkömoottorin lataamiseen. Uusimmissa ajoneuvoissa akkua ladataan jarrutuksen aikana muuttamalla muodostunutta kineettistä energiaa sähköenergiaksi. Kuvassa 2 on vuokaavio, jossa eri sähköautoja luokitellaan voimankäyttöttekniikan perusteella.



Kuva 2. Sähköautojen luokittelu voimankäyttöttekniikan perusteella (Sanguesa & muut 2021, s. 376–377).

2.1 Sähköautojen lataustekniikat

Sähköautojen lataustekniikka voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: latausmoodeihin ja latausmenetelmiin. Nämä määrittävät, kuinka nopeasti autoa voidaan ladata ja missä olosuhteissa se lataus voi tapahtua. Latausmoodit määrittävät fyysisen kytkennän ja turvallisuustason, kun taas menetelmät määrittävät lataustapahtuman. Yleisimmin käytetty menetelmä on CC-CV-lataus.

2.1.1 Latausmoodit

Latausmoodit eli -tilat on porrastettu kolmelle eri tasolle. Tasot on porrastettava virran, jännitteen ja latausnopeuden mukaan ja niiden määrittämisestä vastaavat eri kansainväliset organisaatiot kuten: EPRI, SAE Yhdysvalloissa ja IEC Euroopassa (Mastoi, ym., 2022, s. 11508).

Ensimmäinen taso on edullisin, mutta myös hitain vaihtoehto. Tason latauskaapelit sisältyvät jokaisen sähköauton mukana toimitettaviin tarvikkeisiin. Nämä kaapelit ovat universaaleja, ja ne voidaan kytkeä mihin tahansa 120 voltin pistorasiaan ilman lisäasennuksia. 1-tason laturi pystyy lataamaan 2,4 kW:n maksimiteholla eli noin 65 km kahdeksassa tunnissa. Keskiwertokuluttaja jää tämän alle, joten monelle riittää ensimmäisen tason lataus. Lisäksi ensimmäisen tason latauksesta hyötyvät ne, joilla on 1-tason latauspisteitä työpaikoilla, koska autojen lataaminen onnistuu päivän mittaan. Koska 1-tason latauskaapeli ei riitä pitkiin työmatkoihin tai viikonloppuretkiin, sähköauton kuljettajat kutsuvat sitä usein hätälaturiksi tai ylläpitolatauslaitteeksi. (Mastoi, ym., 2022, s. 11509).

Toisen tason latausmuoto on yleisin julkisissa tiloissa ja asuinalueilla. Se hyödyntää 240 V:n yksivaiheista voimalähdettä 40 A:n maksimivirralla tai 400 V:n kolmivaiheista lähdettä 80 A:n maksimivirralla. 2-tason latausasemat lataavat 12 kW:n maksimiteholla,

mikä vastaa 160 km:n toimintasäteen lataamista kahdeksassa tunnissa. Latausjärjestelmiin on rakennettu ylivirta- ja ylijännitesuojaus (Mastoi, ym., 2022, s. 11509). EU:ssa käytetään yleisesti IEC 62196 -standardien mukaisia liittimiä 2-tyyppiä vaihtovirrälle ja 3-tyyppiä tasavirrälle (Bischofberger, 2023). Yleisintä tasavirta-liitintä kutsutaan CCS-liittimeksi, koska se lisää nopean tasavirtalatauksen mahdollisuuden 2-tyypin AC-liittimeen sekä mahdollisuuden hidas- että pikalataukseen yhdellä liittimellä (Scanoffice).

Kolmannen tason latausmoodi on nopein, ja tason latausasemia löytyy pääasiassa kaupallisista tiloista, kuten huoltoasemilta. 3-tason laitteet lataavat akun yleensä 80 % :iin 15–20 minuutissa DC-pikalatauksella. Latausjännitteet ovat tyypillisesti 200–600 V ja teho on 36–240 kW. (Mastoi, ym., 2022, s. 11510)

2.1.2 Latausmenetelmät

Latausmoodien lisäksi sähköautoja voidaan ladata usealla eri menetelmällä, jotka eroavat toisistaan tekniikan, tehokkuuden ja käytännöllisyyden osalta. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi johtava eli langallinen lataaminen, langaton lataaminen sekä akunvaihto.

Johtavan lataamisen etuja ovat sen taloudellisuus, nopea latautuminen ja korkea tehokkuus. Sähköauton sisäiset latauskomponentit, kuten AC-DC-muuntimet, tarjoavat hidasta latausta (1- ja 2-moodit) ja ulkopuoliset latausasemat taas pikalatausta 3-moodilla. Langaton lataus perustuu taas sähkömagneettiseen induktioon. Vastaanottokela on asennettuna autoon, ja latauskela on maanpinnassa, jolloin lataamiseen ei tarvita johtoa. Tämä mahdollistaa latauksen ajonaikana, mutta menetelmällä on merkittäviä rajoituksia, kuten hyötysuhteeseen, joka on johtavaa latausta heikompi. Lisäksi vastaanottokelan tulee olla alle metrin etäisyydellä, jotta energiansiirto olisi tehokasta, ja mikäli lähettäjäkela ei suljeta heti lataamisen päätyttyä, syntyy pyörrevirtahäviöitä. Akkujenvaihtoasemat tarjoavat vaihtoehtoisen

ratkaisun, jossa tyhjennetty akku vaihdetaan ladattuun ilman, että kuljettaja poistuu autosta. Akunvaihtomenetelmässä auton käyttäjä vuokraa akun aseman omistajalta kuukausimaksulla, mikä lyhentää yksittäisen akun latausnopeutta ja samalla pidentää sen elin kaarta. Menetelmää rajoittavat sen logistiset haasteet. Vara-akkujen hankinta vaatii merkittävää pääomainvestointia ja akkujen säilyttäminen vaatii runsaasti tilaa. (Mastoi, ym., 2022, ss. 11510-11511)

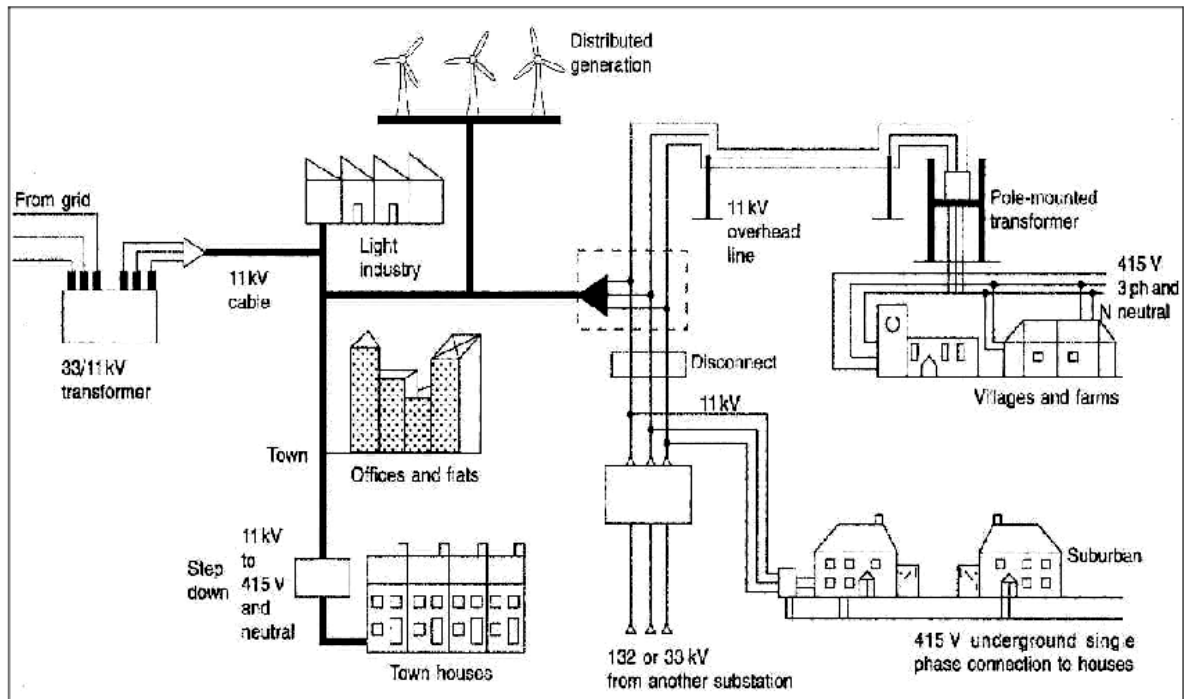
CC-CV-latausmenetelmä yhdistää vakiovirta- ja vakiojännite-latausten edut kompensoimalla kummankin menetelmän haittoja. Vakiovirtalatauksessa akkua ladataan tasaisella ennalta määritetyllä virralla. Virralle on asetettu jokin rajoitus ylivirran estämiseksi. Menetelmää käytetään yleisesti nikkeli-kadmium- ja litiumioniakuissa, mutta sen haasteena ovat varaustilan kumulatiiviset virheet, jotka voivat johtaa yli- tai alilataukseen sekä lyhentää akun elinkaarta. Vakiojännitelatauksessa latausvirta säädetään arvioidun varaustilan mukaan vakiojännitteisellä virtalähteellä. Menetelmän haasteena on, että latauksen alussa suuret virrat voivat vaurioittaa akkua. CC-CV-menetelmässä aloitetaan vakiovirtavaiheella, jonka aikana akku ladataan 85 %:iin. Tämän jälkeen siirrytään vakiojännitteeseen. Menetelmän yksinkertaisuus on etu, koska akun mallia ei tarvitse tuntea, mikä tekee operoinnista suoraviivaista. Menetelmä ei sovellu pikalatauskäyttöön, koska vakiojännitevaihe on liian hidas. (Mastoi, ym., 2022, s. 11515)

2.2 Jakeluverkkojen rakenne

Sähköjakeluverkko-infrastruktuuri kuljettaa sähköenergian voimalaitoksilta loppukäyttäjille. Jakeluverkko ottaa sähköön suurjänniteverkosta ja alentaa sen muuntajien kautta pienjänniteverkkoon, josta sähkö siirretään loppukäyttäjille (Nireekshana;Shiraz;Divyashree;Naaz;& Sooumya, 2025, s. 2555).

Verkkotopologian perusteella jakeluverkot jaetaan kolmeen päätyyppiin: säteittäiseen, silmukoituun ja rengasverkkoon. Säteittäisen verkon hyötyjä ovat sen yksinkertaisuus ja edullisuus. Siinä sähkö kulkee yhtä reittiä pitkin kuormille, mikä tekee siitä haavoittuvaisen. Yksittäinen vika syöttöjohdossa katkaisee sähkön saannin kaikilta sen takana olevilta kuormilta. Rengasverkossa virta kulkee suljetun silmukan sisällä, mikä tarjoaa virralle vaihtoehtoisen kulkureitin, parantaen jakeluverkon toimivuusvarmuutta. Yhteen liitetty eli silmukoitu verkkojärjestelmä parantaa verkon luotettavuutta ja joustavuutta yhdistämällä sähköasemia ja syöttölinjoja. Tämä johtaa pienempiin häviöihin ja parempaan jännitteen säätelyyn. Yhteen liitettyjä verkkoja rajoittavat niiden taloudellisuus ja monimutkainen ohjattavuus. Tätä ratkaisua käytetään tyypillisesti teollisuusalueilla ja kriittisissä kuormissa (Nireekshana;Shiraz;Divyashree;Naaz;& Sooumya, 2025, ss. 2555-2557). Kuvassa 3 on esitetty esimerkki jakeluverkon arkkitehtuurista.

Perinteisissä jakeluverkoissa sähkö virtaa yksisuuntaisesti ja kuluttajan rooli on passiivinen. Älyverkko muuttaa rakenteen kaksisuuntaiseksi lisäämällä sensoreita, älykkäitä elektronisia laitteita sekä automaattisia ohjausjärjestelmiä, mikä mahdollistaa reaaliaikaisen valvonnan ja hajautetun energiatuotannon saumattoman liittämisen verkkoon. Älyverkko hyödyntää SCADA-, AMI- ja IoT-tekniikkaa kuorman tasaamiseen, vikojen havaitsemiseen ja ennakoivaan kunnossapitoon (Nireekshana;Shiraz;Divyashree;Naaz;& Sooumya, 2025, s. 2558).



Kuva 3. Esimerkki sähköjakeluverkosta (Nireekshana; Shiraz; Divyashree; Naaz; & Soomya, 2025, s. 2557).

2.3 Sähkökulutuksen kuormitusprofiilit

Kuormitusprofiilit ovat keskeisiä työkaluja sähköverkon suunnittelussa ja kuorman tasapainottamisessa. Ne kuvaavat sähköenergian kulutuksen vaihtelua ajan funktiona. Kuormitusprofiilit ovat arvioita käyttötottumusten muutoksista päivän aikana, ja niitä voidaan mallintaa joko empiirisen aineiston, matemaattisen mallin tai näiden kahden yhdistelmän avulla. Anvari & muiden (2022, s. 2) mukaan kuormitusprofiili määrittyy kahdesta päätekijästä: keskimääräisestä kuormitusprofiilista (ALP) sekä sen ympärillä tapahtuvista lyhytaikaisista vaihteluista (SFP).

Energiantoimittajat ovat ennustaneet energiankulutusta käyttämällä standardisoitua kuormitusprofiilia (SLP). Esimerkiksi Saksassa käytettävässä H0 SLP:ssä oletetaan, että jokainen kotitalous käyttäytyy samalla tavalla joka arkipäivä (Proedrou, 2021, s. 12118). Anvari ja muut (2022, ss. 5-8) osoittivat empiirisesti, että mitattu kulutusdata eroaa merkittävästi H0 SLP:stä. Kun mittauksia tehdään sekuntitason aikaresoluutiolla,

todetaan kulutuspiikkejä, jotka jäisivät huomioimatta 15 minuutin aikaresoluutiossa. Piikkien merkitys korostuu pienjännitejakeluverkossa.

Kuormitusprofiilimallit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään. Yhtäältä alas-mallissa tai ehdollisen kysynnän analyysimallissa yksittäisen kotitalouden kuormitusprofiili muodostetaan makrotaloudellisista muuttujista sekä useiden kotitalouksien kokonaisenergiakulutuksen arvioista. Alhaalta ylös -mallit käyttävät puolestaan mikrotason muuttujia, kuten aktiivisten asukkaiden määrää, laitteiden energiankulutusta ja käyttöaikaa. Niillä pystytään luomaan erittäin yksityiskohtaisia profiileja yksittäisille kotitalouksille. Näiden kahden yhdistelmät muodostavat hybridimallin (Proedrou, 2021, ss. 12116-12118).

3 Sähköautojen latauksen vaikutukset jakeluverkkoon

Sähköautojen määrän kasvu on merkittävä muutostekijä nykyisessä sähköjakeluinfrastruktuurissa. IEA:n mukaan globaali sähköautokanta on ylittänyt 10 miljoonaa autoa ja ennusteiden mukaan määrä kasvaa 300 miljoonaan vuoteen 2030 mennessä (Li & Jenn, 2024, s. 1). Tikka (2024, s. 14) toteaa, että sähköautojen latauskuormien kasvu voi johtaa kysyntähuippujen lisääntymiseen, merkittäviin muutoksiin kuormitusprofiileissa sekä tarpeeseen investoida infrastruktuuriin.

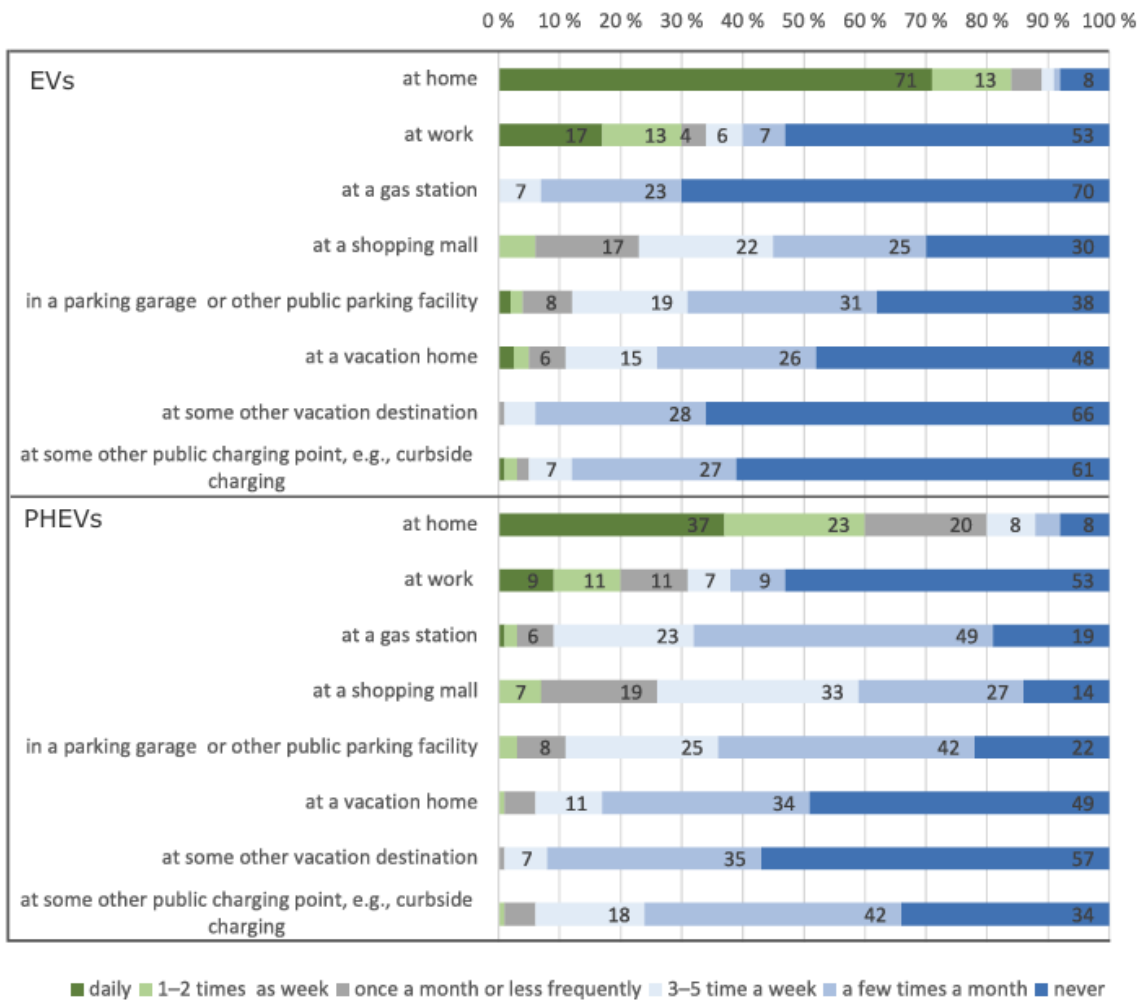
Mastoi & muiden (2022, s. 111520) mukaan sähköautojen verkkoon integrointi vaikuttaa merkittävästi jakeluverkon vakauteen ja sähkönlaatuun. Perinteisesti jakeluverkot on suunniteltu toimimaan helposti ennustettavien kotitalouksien ja teollisuuden kysynnän parissa. Sähköautot tuovat mukanaan uuden kuormatyyppin, joka on ajallisesti epätasainen ja ajoittain paikallisesti ryhmittynyt.

Tässä kappaleessa tarkastellaan löytöjä kirjallisuudesta koordinoimattoman latauksen vaikutuksista jakeluverkkoon, latausinfrastruktuurin vaihtoehtoja ja niiden

sähkönlaatuvaikutuksista sekä koordinoitun latauksen ja älyratkaisuiden mahdollisuuksista.

3.1 Koordinoimattoman latauksen vaikutukset jakeluverkkoon

Koordinoimattomalla latauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa sähköauton akut alkavat latautua välittömästi verkkoon kytkemisen jälkeen tai käyttäjän ennalta määrittämän kiinteän viivästyksen jälkeen (Akhavan-Rezai;Shaaban;El-Saadany;& Zidan, 2012, s. 2). Käytännössä tämä tarkoittaa, että käyttäjä laittaa auton pistorasiaan esimerkiksi kotiin tai työpaikalle saapuessaan ja määrittää lataamisen ajankohdan. Lataus alkaa joko välittömästi tai haluttuna ajankohtana täydellä nimellisteholla. Tämä on toistaiseksi yleisin tapa ladata maailmanlaajuisesti. Kuvassa 4 nähdään kansallisen liikennetutkimuksen tuloksia sähköautojen latauspaikoista. Tutkimuksen tulokset vahvistavat koordinoimattoman latauksen yleisyyden. Vaikka se on yleinen ja käyttäjälle vaivaton, luo se jakeluverkon kannalta erittäin haastavan kuormitustilanteen, johon olemassa oleva infrastruktuuri ei ole suunniteltu.

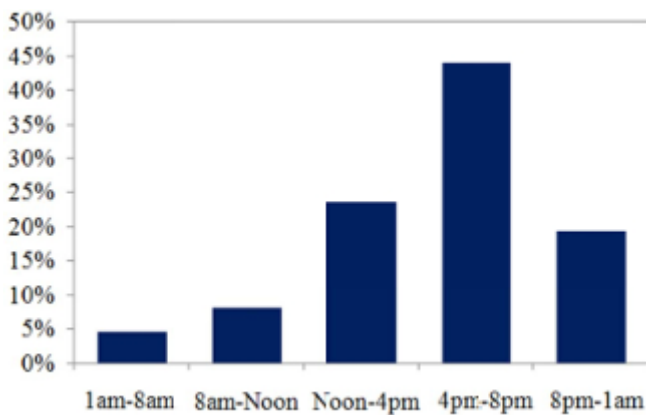


Kuva 4. Sähköautojen latausosuudet sijainnin mukaan (Tikka, 2024, s. 44).

Nykyiset jakeluverkot kestävät tilanteen, jossa sähköautojen markkinaosuus on vielä alhainen, mutta markkinaosuuden odotetaan nousevan nopeasti seuraavien vuosien aikana hintojen laskun, latauspisteiden lisääntymisen sekä sähköautojen laajemman tuotannon myötä. Tämä sähköautojen aiheuttama lisäkuorma voi aiheuttaa vakavia seurauksia, jos sitä ei hallita asianmukaisesti (Ahmed R.; Aboul'fotouh;& Wael A.Fatah, 2017, s. 1).

3.1.1 Vaikutukset kuormitusprofileihin ja huippukuormaan

Koordinoimattoman latauksen suurin ongelma on sen tapahtuminen samanaikaisesti huippukysynnän kanssa. Tämä on suora seuraus ihmisten liikkumistottumuksista. Kuten kuvassa 5 huomataan, autot saapuvat kotiin iltapäivisin, jolloin kysyntä on korkeimmillaan. Kuva on kansallisen liikennetutkimuksen keräämä tilasto autojen saapumisajankohdista Pohjois-Amerikassa. Vaikka tilastot ja tutkimukset painottuvat Pohjois-Amerikkaan, ne voivat tarjota arvokkaita näkemyksiä sähköautojen käyttöönottoon liittyvistä haasteista ja trendeistä.

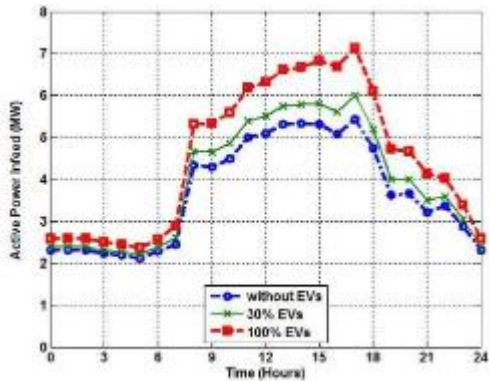


Kuva 5. Ajoneuvojen saapumisaikajakauma Pohjois-Amerikassa (Akhavan-Rezai;Shaaban;El-Saadany;& Zidan, 2012, s. 4).

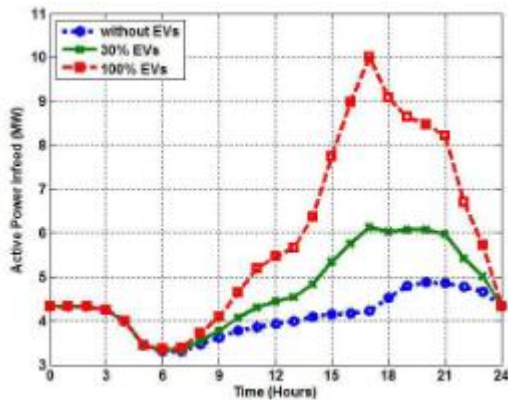
Sähköautojen lataaminen silloin, kun keittiö-, valaistus- ja muut kodinkoneet ovat jo käytössä, nostaa kokonaiskulutusta, mikä taas lisää nykyistä huippukysyntää juuri silloin, kun verkolla on vähiten joustovaraa.

Tämän havainnon ovat vahvistaneet myös Ahmed ym. (2017) joiden tutkimuksessa tarkkaillaan kuormitusprofileja kahdessa eri testijärjestelmässä. Kansainvälisessä RBTS-vertailujärjestelmässä sekä Egyptin El-Shoroukin kaupungin sähköverkossa. Tarkastelu tehtiin 30 %:n ja 100 %:n markkinaosuuden osalta, ja molemmat osoittivat, että koordinoimaton lataus johtaa huomattavasti suurempiin päivittäisiin kuormitushuippuihin verrattuna normaalikulutukseen. Huomionarvoista on myös se, että koordinoimaton sähköautojen lataus johtaa huippukuormien epälineaariseen

kasvuun. Kuten kuvissa 6 ja 7 huomataan, 100 %:n markkinaosuus voi johtaa 30 %:n markkinaosuudessa havaittujen vaikutusten moninkertaistumiseen.



Kuva 6. Syöttöjohdon kuormitusprofiili RBTS-simuloinnissa (Ahmed R.; Aboul'fotouh; & Wael A.Fatah, 2017, s. 59).



Kuva 7. Syöttöjohdon simulointi El-Shoroukin simuloinnissa (Ahmed R.; Aboul'fotouh; & Wael A.Fatah, 2017, s. 61).

Tikan (2024, s. 19) mukaan sähköautojen latauskuormat ovat vaihtelevimpia, sillä lataamiseen tarvittava teho vaihtelee arvaamattomasti sähköauton liikkeiden ja omistajan toiminnan takia. Kotitalouksien sähkönkulutusprofiilit olivat helposti ennustettavissa, koska muutokset tapahtuivat asteittain ennen sähköautojen yleistymistä. Sähköajoneuvojen liikkuvuuden vuoksi niiden aiheuttamien kuormien ennakoiminen ja hallitseminen on haastavaa.

Tikka ym. (2023) tarkastelivat viittä ajoneuvoa laboratorio-olosuhteissa ja osoittivat näiden ajoneuvojen tarvitsevan lataukseen enemmän energiaa talvipakkasilla sekä

niiden latausajan pitenevän. Muutos johtuu siitä, että akussa dendriittejä muodostuu enemmän alhaisissa lämpötiloissa, mikä voi aiheuttaa akun sisäisiä oikosulkuja. Tämä tarkoittaa sitä, että akuilla on tietty käyttölämpötila, jonka ylittäminen on välttämätöntä latauksen aikana. Aktiivinen lämpötilan säätö vaatii energiaa, siksi jakeluverkossa näkyy lisäkuormitusta (Tikka ym., 2023, s.2).

3.1.2 Vaikutukset jakeluverkon toimintaan

Kuormitusprofiilin muutokset vaikuttavat kolmeen jakeluverkon suorituskykyyn liittyvään päätekijään: jännitteen laatuun, laitteiden lämpöylikuormitukseen ja energiahäviöihin. On syytä mainita, että nämä kolme tekijää voivat vaikuttaa toisiinsa ja niiden yhteisvaikutus voi olla suurempi kuin yksittäisten tekijöiden summa. Tätä seikkaa kuvaavat Ahmed ym. (2017, s. 1). Heidän mukaansa, kun sähköajoneuvojen integrointi on liian laajaa ja hallitsematonta, syöttöjohtojen ja muuntajien ylikuormitus, jännitteen laadun heikkeneminen, järjestelmän suuremmat häviöt ja korkeammat kustannukset ilmenevät samanaikaisesti.

Jännitteen aleneminen voi ilmetä, kun sähköauto on kytketty verkkoon ja kuluttaa tehoa. Jännitteen alenemisen suuruus riippuu tekijöistä, kuten sähköauton laturin nimellistehosta, samaan vaiheeseen kytkettyjen sähköautojen lukumäärästä, verkon impedanssista sekä jännitteenvälvoimän ohjauslogiikasta, jota sovelletaan käynnistyksen yhteydessä ja säännöllisin väliajoin (Letha, ym., 2023, s. 2). IEC 60364-5-52 standardin mukaan sallittu jännitehäviö on 3 % valaistuksen kuormilla ja 5 % muilla kuormilla. Akhavan-Rezai ym. (2012) tekemä tutkimus koski 41 solmun maaseutuverkkoa Kanadassa. Tutkimuksessa havaittiin, että normaali latauksessa 1.tasossa (12 A, 1,44 kW/h) jännitteen lasku pysyy 6 %:n rajoissa, kunnes sähköautojen markkinaosuus nousee yli 5%. Pikalatauksessa 2. tasossa (30 A, 6 kW/h) jännitteen lasku ylittää 6–8 %:n puolella solmupisteessä, kun markkinaosuus on 25–30 %. Tämä ylittää IEC 60364-5-52-standardin mukaisen jännitteen alarajan. Ahmed ym. (2017) löydöt ovat yhdenmukaisia siinä, että jänniteprofiilit laskevat merkittävästi sekä RBTS-

vertailujärjestelmässä että El-Shoruokin jakeluverkossa, kun sähköautojen markkinaosuus nostetaan 30 %:iin tai 50 %:iin.

Lämpölikuormitus voi lyhentää laitteiden käyttöikä. Muuntajien ja syöttöjohtojen kuormitus kasvaa, kun sähköautojen markkinaosuutta lisätään (Ahmed R.; Aboul'fotouh;& Wael A.Fatah, 2017, s. 62). Yan ja Kezovic ovat todenneet Mastoi ym. (2022, s. 11521) teoksessa, että joitakin nykyisen sähköverkon komponentteja ei ole suunniteltu kestävänsä lisäkuormitusta, mikä johtaa komponenttien ylikuormittumiseen ja muuntajien käyttöiän lyhenemiseen. Lisäksi tehohäviöt ovat seurausta kasvavasta sähkönkulutuksesta. Häviöt kasvavat merkittävästi pikalatauksen lisääntyessä (Akhavan-Rezai;Shaaban;El-Saadany;& Zidan, 2012, s. 5).

Della Giustina ym. (2014, s. 1) nostavat esiin sellaisen seikan, joka hankaloittaa edellä mainittujen haasteiden hallintaa. Mittauslaitteita on vähän verkossa. Niitä on enimmäkseen sähköasemilla. Heidän mukaansa elektronisia mittauslaitteita on otettu käyttöön muutamissa maissa, mutta ne ovat enimmäkseen tarkoitettu laskutusta ja asiakashallintaa varten. Mittauslaitteiden puute on suurin ongelma verkon reaaliaikaisessa arvioinnissa. Puute saattaa vaatia sähköverkon operaattoreita ottamaan pseudomittauksia verkon tilasta.

3.2 Jakeluverkon vahvistaminen ja infrastruktuuriin investoinnit

Liikenteen sähköistyminen asettaa suuria vaatimuksia jakeluverkkojen kapasiteetille. Koordinoimattoman latauksen haasteet voivat johtavaa verkon kantokyvyn ylitykseen, mikä luo toimintahäiriöitä verkkoon. Verkon toimintakyvyn takaamiseksi on tehtävä fyysisiä vahvistustoimenpiteitä ja systemaattisia investointeja,

3.2.1 Rakenteelliset muutostarpeet

Li & Jen (2024) ovat arvioineet tutkimuksessaan koordinoimattoman lataamisen vaikutusta jakeluverkkoihin Kaliforniassa. Tutkimuksen mukaan koordinoimaton lataaminen johtaa siihen, että 50 % kaikista syöttölinjoista ylikuormittuu vuoteen 2035 mennessä ja 67 % vuoteen 2045 mennessä. Tämä vastaa 25 GW kapasiteettilisästarvetta sekä 6–20 miljardin infrastruktuurikustannusta. Li & Jen (2024) toteavat, että sähkön hinta laskee suurista infrastruktuurikustannuksista riippumatta, sillä yhä useamman kotitalouden sähkönkulutus kasvaa, mikä luo hinnalle laskupaineen. Sähkönkulutuksen vaihtelu erityyppisissä paikoissa voi vaikuttaa voimakkaasti siihen, kuinka kuormitus rasittaa verkkoa. Esimerkiksi työpaikoilla ladataan eri aikoina kuin kotona ja eri tehoilla. Sähköautojen yleistyminen tulee rasittamaan enemmän kotitalouksien verkkoja kuin julkisen sektorin verkkoja. Vuoden 2025 jälkeen ylikuormittuneiden kotilatausverkkojen määrän ennustetaan lähes kaksinkertaistuvan suhteessa kotitalouksien latauskapasiteettiin, ja vastaava ylikuormitustrendi on havaittavissa myös julkisissa latausinfrastruktuurissa, mikä edellyttää merkittäviä päivityksiä syöttöjohtojen kokonaiskapasiteettiin (Li & Jenn, 2024, s. 10).

Steinbachin & Blaschken (2024) mukaan sähköautoista johtuvat ylikuormitusten määrät ovat 12 kertaiset korkeantulotason naapurustoissa erialueilla, minkä takia alueilla on suurempi tarve verkon vahvistamiseen. Tarve nostaa alueet jakeluverkko-operaattorien investointiprioriteettilistan kärkeen voi rajoittaa latausinfrastruktuurin kehittämistä pienituloalueilla. Verkon vahvistuskustannusten epäsymmetria todettiin olevan suurin lähiöissä, joissa hinta-ero on 33 kertainen. EU-tasolla nämä kustannusepäsymmetriat voisivat nousta yhteensä noin 14 miljardiin euroon. Nykyinen tariffirakenne kattaa verkon vahvistuskustannukset tasahintaisella sähkön hinnannousulla kaikille kuluttajille.

Lisäksi Wang ym. (2026) tutkivat maaseudun jakeluverkkojen investointien optimointia tilanteessa, jossa sähköajoneuvojen yleistyminen maaseudulle kasvattaa

latauskuormitusta voimakkaasti. Tutkimuksessa todettiin vanhat verkkorakenteet ja alhainen kuormitustiheys korostavat maaseudun jakeluverkkojen haavoittuvuutta.

3.4.2 Investointistrategiat

Investointitarpeet jakeluverkon päivittämiseksi ovat globaalilla tasolla huomattavia. IEA:n mukaan verkkoinvestointien on lähes kaksinkertaistuttava vuoteen 2030 mennessä. EU:n tasolla jakeluverkkojen investointitarpeiden arvioidaan olevan 375–425 miljardia euroa tällä vuosikymmenellä, ja Euroopan tilintarkastustuomioistuin toteaa, investointien olevan 72 miljardia euroa vuodessa vuoteen 2030 saakka (Butorac, 2025, s. 5). IEA:n (2023) mukaan verkkoinvestointien painopiste on erityisesti jakeluverkkojen digitalisoinnissa ja modernisoinnissa, minkä lisäksi tarvitaan merkittävää fyysisen infrastruktuurin laajentamista energiasiirtymän vaatimusten täyttämiseksi. Tikka ym. (2022) osoittavat, että EV-latauksen dynaaminen ja sijaintiriippuvainen luonne edellyttää perinteisten suunnittelumallien korvaamista dataohjautuvilla menetelmillä, kuten konvoluutioneuroverkkoihin perustuvalla sijaintiin perustuvalla mallinnuksella.

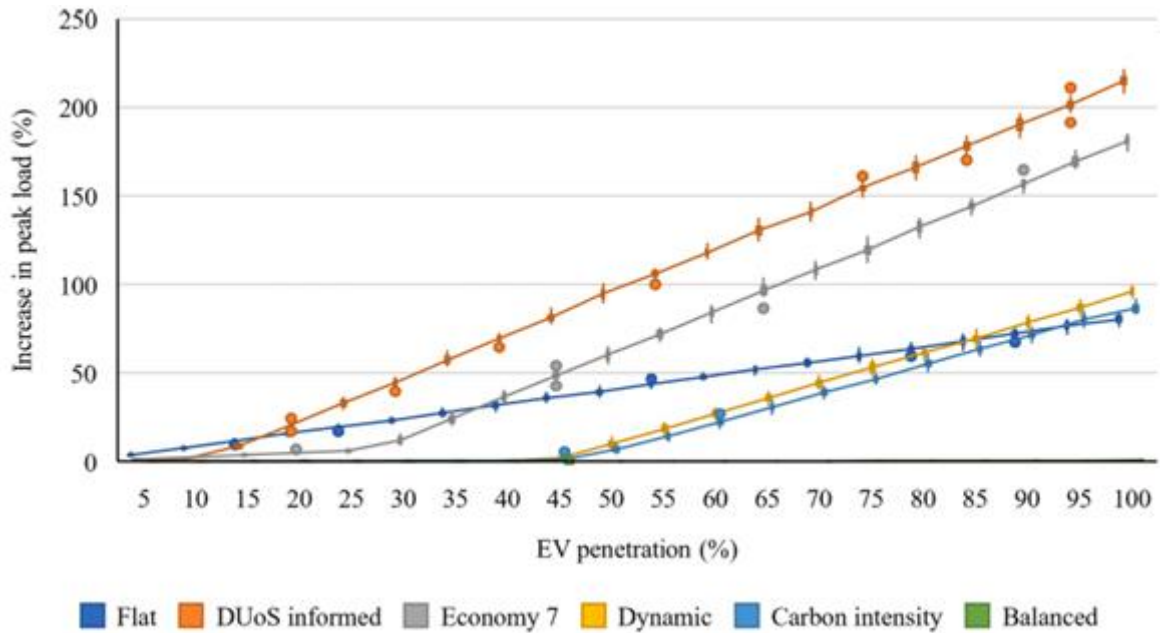
3.3 Koordinoitu lataus ja älykkäät ratkaisut

Sähköautojen lataamisen satunnaisuuteen liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi on ehdotettu lukuisia menetelmiä. Näitä yhdistää tavoite tasata kuormitushuippuja sekä hyödyntää sähköautojen akkuja osana sähköverkon joustavuutta. Menetelmät toimivat yhdessä ja luovat ratkaisun, jota voidaan määritellä koordinoituksi lataamiseksi.

Koordinoidulla latauksella tarkoitetaan kaikkia niitä menetelmiä, joilla latauksen ajankohtaa, tehoa tai paikkaa ohjataan verkon tilan, sähkön hinnan tai muiden signaalien perusteella (Tikka, 2024; Daneshzand ym., 2023). Nämä ratkaisut jakautuvat kolmeen pääluokkaan: älylataukseen eli kysynnän ohjaukseen, Vehicle-to-Grid-tekniikkaan sekä latausasemien optimaaliseen sijoitteluun.

3.3.1 Älylataus ja kysynnänohjaus

Älykäs lataus kattaa joukon ohjausmenetelmiä, joiden avulla sähköautojen latausta voidaan sovittaa verkon tilan, sähkön hinnan ja käyttäjän tarpeiden mukaan. Dynaaminen kuorman hallinta on esimerkki strategiasta, jossa latausta voidaan ohjata tietyn rakennuksen tai pysäköintialueen hetkellisen kapasiteetin mukaan. Daneshzand ym. (2023) osoittivat laajaan, yli 130 000 todelliseen lataustapahtumaan perustuvaan aineistoon nojautuen, että dynaaminen tariffiohjaus on tehokkain yksittäinen strategia ehkäistä jakeluverkon ylikuormituksia, kuten kuvassa 8 havaitaan. Eri tariffien yhdistelmä todettiin vähentävän verkkoon kohdistuvaa rasitusta paremmin kuin mikään yksittäinen tariffi. He suorittivat tutkimustyön simulaatioina, joissa korotettiin sähköautojen markkinaosuutta porrastetusti viiden prosentin välein. Kuvassa 8 todetaan, että huippukuorman kasvu vaihteli merkittävästi tariffien mukaan. Koordinoimattoman latauksen (Flat) aiheuttama huippukuormannousu kasvoi lineaarisesti, kun taas dynaamiset mallit eivät vaikuttaneet huippukuorman nousuun jopa silloin, kun sähköautojen osuus oli 40 %. Dynaamiset kuormanhallintamallit hyödyntävät teknisiä aggregaattoreita latauksen säätämiseksi. Tällä varmistetaan, että verkko ei ylikuormitu, ja taataan auton käyttäjälle mahdollisuus pitää akun varaustason mahdollisimman korkealla seuraavaa käyttöä varten. (Tikka, 2024, s. 49)



Kuva 8. Kotitalouksien huippukysynnän kasvu sähköautojen käyttöönoton tason mukaan (Daneshzand;Coker;Potter;& Smith, 2023, s. 7).

Hintalähtöisissä strategioissa tavoitteena on minimoida latauskustannukset ja varmistaa riittävä varaustaso seuraavaa käyttöä varten. Niissä lataus ajoitetaan kustannustehokkaimmille ajankohdille joko SPOT-hinnan tai TOU-tariffin mukaan. SPOT-hintavalvonnassa latausajankohta määräytyy sähkömarkkinahinnan perusteella, ja aggregaattori optimoi latauskustannukset ottaen huomioon kuljettajan liikkuvuustarpeet. TOU-tariffivalvonnassa ratkaisu voi olla yksinkertaisempi. Se voidaan mallintaa ajastimella, joka käynnistää latauksen automaattisesti, kun yöhinnat alkavat. Siinä ei tarvita jatkuvaa tietoliikenneyhteyttä, ja jakeluverkkoyhtiö pystyy ohjaamaan latausta suoraan AMR-mittarin kautta. (Tikka, 2024, s. 50)

Tikka ym. (2014, s. 7) todistivat empiirisesti, että SPOT-tariffimalliin perustuvassa latausstrategiassa onnistuttiin pudottamaan latauskustannuksia 41 prosentilla 0,29 eurosta 0,17 euroon viikossa hallitsemattoman latauksen simulaatioon verrattuna. Säästö vastasi kuuden euron vuosisäästöjä. Tikan ym. mukaan on kuitenkin huomioitava, että säästöpotentiaali on vahvasti sidoksissa sähkön hinnan vaihteluun, joten vuositason arvioita tulisi pitää suuntaa antavina eikä absoluuttisina totuuksina.

Strategiaa haastaa sähkönmyyjien ja jakeluverkko-operaattorien välinen etuusriita. Operaattorit pyrkivät tasaiseen kuormitukseen verkon kapasiteetin optimoimiseksi, kun taas sähkönmyyjät saattavat ohjata kuormia markkinahinnan perusteella tavalla, joka on verkon kannalta epäedullista. (Tikka;Henri;Lassila;& Partanen, 2014)

Kustannusten minimoinnin lisäksi älykästä latausta voidaan hyödyntää sähköjärjestelmän lisäpalveluissa, erityisesti taajuusreservimarkkinoilla. Sähköjärjestelmän taajuus kuvaa tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa. Kun järjestelmässä on enemmän kulutusta kuin tuotantoa, verkon taajuus laskee. Vastaavasti, jos tuotantoa on enemmän kuin kulutusta, taajuus nousee. Suomen ja myös Euroopan taajuusreservimarkkinat koostuvat kolmesta luokasta: nopeat taajuusreservit (FFR), normaalikäytön vakausreservit (FCR-N) sekä häiriötilanteiden vakausreservit (FCR-D). FCR-N-markkinoiden keskimääräinen tuntimarkkina-arvo Suomessa oli vuonna 2020 noin 20,83 €/MWh ja keskimääräinen volyyymi 34,6 MW, joten jo yhden kilowatin joustavan kapasiteetin tarjoaminen jokaisena vuoden tuntina tuottaisi palveluntarjoajalle noin 180 euron vuositulot. Vaikka yksittäisen sähköauton ohjattava teho voi ylittää huomattavasti 1 kW:n rajan, se ei ole käytettävissä jatkuvasti. Siitä huolimatta taajuusreservimarkkinoilta saatava lisätulo toimii merkittävänä kannustimena älykkään latauksen ohjaukselle, sillä sen tekninen toteutettavuus on jo osoitettu. (Markkula, Tikka, & Järventausta, 2021)

3.3.2 V2G-teknologia ja kaksisuuntainen tehonsiirto

Energiavarastot tulevat olemaan keskeinen osa tulevaisuuden älyverkoja. Toistaiseksi akkujärjestelmien korkeat hinnat ovat estäneet niiden taloudellisesti kannattavan hyödyntämisen jakeluverkoissa, mutta teknologian kehittyessä ja kustannusten laskiessa tilanne on muuttumassa (Lassila;Haakana;Tikka;& Partanen , 2012, s. 515). Siksi V2G-teknologiaa voidaan pitää lupaavana välivaiheena, jossa sähköautojen

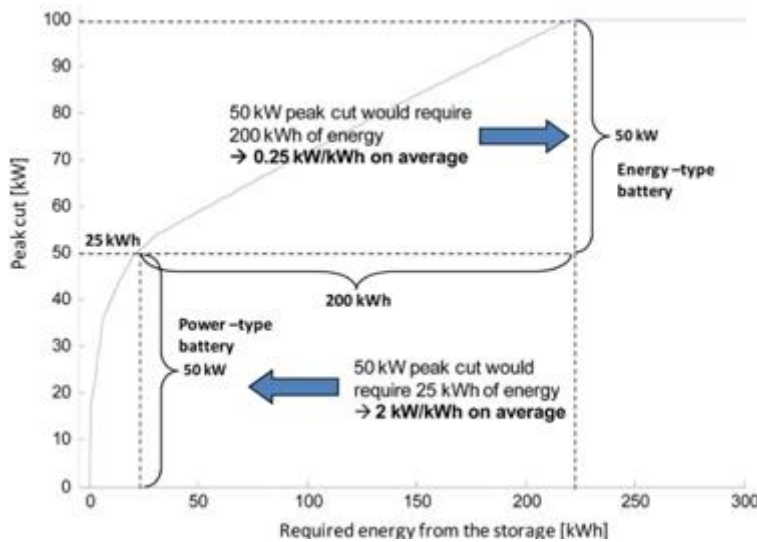
olemassa olevaa akkukapasiteettia hyödynnetään verkon energiavarastona ilman erillisten kiinteiden varastojärjestelmien investointikustannuksia.

V2G-tekniikka mahdollistaa sähköenergian siirtämisen sähköauton akusta takaisin verkkoon. Mastoi ym. (2022, s. 11506) mukaan sillä voidaan tarjota myös oheispalveluita, kuten taajuuden säätöä, loistehon kompensointia ja huippukysynnän tasoittamista. Tämä kaksisuuntainen lataustekniikka on osa laajempaa markkinakonseptia, johon osallistuvat sähköauton omistajat, prosumerit eli energiaa verkkoon myyvät kuluttajat, rakennusten hallinnoijat sekä jakeluverkon operaattorit (Tikka, 2024, s. 50). Mendes ym. (2023, p. 2) mainitsevat liiketoimintamallin, jossa yksittäiset sähköauton omistajat tarjoavat joustavuuspalveluja suoraan jakeluverkon operaattoreille. Malli voidaan toteuttaa sekä kotilatauksena että julkisena lataamisena. Kotilatauksessa kodin energianhallintajärjestelmä yhdessä muiden verkkoon kytkettyjen laitteiden kanssa hoitaa auton lataamista ja koordinoi sähköauton latauksen osaksi tasapainottamismarkkinoita. Julkisessa lataamisessa latauspisteoperaattorit voivat toimia aggregaattoreina hallinnoiden suuria sähköautojen latausistuntosalkkuja. Molemmissa tapauksissa verkko-operaattorin maksama palvelukorvaus kulkee aggregaattorin kautta sähköauton omistajalle.

Lassila ym. (2012) tutkivat V2G-teknologian taloudellista potentiaalia jakeluverkon kapasiteetin optimoinnin näkökulmasta. Keskeisenä kysymyksenä oli ”ovatko vapautuvan jakelukapasiteetin hyödyt suuremmat kuin energiavarastojen käytöstä aiheutuvat kustannukset” (Lassila;Haakana;Tikka;& Partanen, 2012). Tutkimuksessa huomattiin, että vapautuneella verkkokapasiteetilla ei ole suoria positiivisia vaikutuksia jakeluverkko-operaattorien tuloihin. Siitä huolimatta älylatauksella voidaan ehkäistä sähköautojen aiheuttamia kuormitushuippuja, mikä puolestaan mahdollistaa verkon vahvistamiseen tarvittavien investointien lykkäämisen. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin sähköautojen akkujen hyödyn riippuvan vahvasti verkon peruskuormituksen muodosta. Esimerkiksi jos huippukäyttöaika on lyhyt, varaston merkitys voi olla merkittävä pienelläkin kapasiteetilla. Kuvassa 9 on vaihdeltu

varastosta otettavan energian määrää ja esitetty sen vaikutus huippukulutuksen leikkaamiseen. Kuvasta voidaan päätellä; että 25 kWh:n varastokapasiteetti riittää leikkaamaan huippukulutusta 50 kW:lla, mutta seuraavan 50 kW:n leikkauksen saavuttaminen vaatisi jo noin 200 kWh:n varastointikapasiteettia, mikä osoittaa rajahyödyn laskevan varastokoon kasvaessa.

Keskitettyssä akkuvarastossa tarvittava purkuteho olisi suuri suhteessa varaston kokoon, kun taas hajautetussa ratkaisussa purkuteho yksikköä kohti jää huomattavasti pienemmäksi. Tämä osoittaa, että hajautetussa ympäristössä merkittävää hyötyä voidaan saavuttaa jo suhteellisen pienellä kokonaisvarastointikapasiteetilla.



Kuva 9. Esimerkki huippukulutuksen leikkaamiseen tarvittavan energian vaikutuksesta (Lassila;Haakana;Tikka;& Partanen , 2012).

Lassila ym. (2012) määrittivät huippukuorman leikkaamiselle kaksi päästrategiaa. Ensimmäisessä varasto ladetaan heti huippukuorman leikkauksen jälkeen peruskuorman laskiessa, jolloin varasto on mahdollisimman täynnä seuraavaa huipputilannetta varten, ja toisessa vaihtoehdossa lataus ajoitetaan pienimmän kuormituksen jaksoihin, kuten yöaikaan, jolloin verkon häviöt minimoituvat. Jälkimmäiseen lähestymistapaan liittyy kuitenkin suurempi riski: matalan kuormituksen jakso voi osoittautua odotettua lyhyemmäksi, jolloin varasto ei ole riittävästi ladattu seuraavan huippukuorman sattuessa. Lassilan ym. (2012) simulointitulosten perusteella V2G-ominaisuuksien käyttöönotto voi laskea syöttölinjan huipputehoa

merkittävästi, kuten erässä tarkastellussa tapauksessa 3,6 MW:n huipputeho laski noin 900 kW:lla 2,7 MW:iin, kun oletuksena oli, että alueen kaikki ajoneuvot olivat sähköautoja. V2G-tekniikan laajamittainen hyödyntäminen edellyttää kuitenkin vielä merkittävää kehitystyötä ohjausjärjestelmissä, viestintäprotokollissa sekä eri toimijoiden välisten markkinamallien selkeyttämisessä (Tikka, 2024, s. 50).

3.3.3 Latausasemien optimaalinen sijoittelu

Latausasemien optimaalisella sijoittelulla on keskeinen rooli sähköautojen käyttöönottoa edistettäessä ja jakeluverkon rasituksen hallitsemisessa. Sijoitteluun vaikuttavat useat tekijät, kuten kuljettajien latausmieltymykset, verkon kapasiteetti, liikennevirrat sekä alueen väestörakenne. Li & Jenn (2024) osoittavat Kalifornian laajuudessa tutkimuksessaan, että kotilataukseen painottuvat syöttöjohdot kuormittuvat kaksi kertaa enemmän kuin julkisen latauksen hallitsevat johdot, mikä viittaa siihen, että latauksen siirtäminen kotoa julkisiin ja työpaikkakohteisiin voisi merkittävästi vähentää infrastruktuurin päivitystarpeita. Sadhu ym. (2022) väittävät, että liikenneverkko ja jakeluverkko ovat tiiviisti kytköksissä toisiinsa. He onnistuvat osoittamaan, että verkkojen yhteinen dynaaminen optimointi voi vähentää kokonaiskustannuksia jopa 36 % verrattuna verkkojen erilliseen operointiin.

Sähköautojen alueellisen jakautumisen mallintaminen on osoittautunut keskeiseksi tekijäksi latausinfrastruktuurin suunnittelussa. Tikka ym. (2022) tutkivat konvoluutioneuroverkon (CNN) soveltuvuutta sähköautojen alueellisen jakautumisen estimointiin jakeluverkon suunnittelun tueksi. Tutkimuksessa todettiin, että CNN-pohjainen malli osoittautui perinteisiä alueellisia mallinnusmenetelmiä tarkemmaksi sähköautojen sijainnin jakautumisen ennustamisessa, koska se pystyy hyödyntämään väestörakenteen ja sähköautojen sijoittumisen välisiä monimutkaisia paikkatietoriippuvuuksia, joita esimerkiksi regressiopohjaiset mallit eivät pysty riittävästi mallintamaan. Tällainen alueellinen mallinnuskyky on jakeluverkko-operaattorin kannalta arvokas, sillä se ohjaa investointeja ennakoitavasti verkossa eikä

reaktiivisesti (Tikka, 2024). Latausasemien sijoittelussa onkin siirryttävä kohti dataohjautuvia, dynaamisia suunnittelumenetelmiä, jotka ottavat huomioon sekä liikennevirtojen ajallisen vaihtelun että verkon paikallisen kapasiteettitilanteen

4 Tulokset

Koordinoimaton lataus lisää kokonaiskulutusta, ja sitä tapahtuu huippukysynnän aikana. Tämä johtuu siitä, että lataus tapahtuu kotona iltapäiväsaikaan, kun kuluttajat kokkaavat ja käyttävät muita kodinkoneita (Tikka, 2024). Li & Jen (2024) tukevat tätä. Heidän tutkimuksessaan tarkasteltiin huippukuorman muutoksia analysoimalla yli 5 000 syöttöjohdon kuormituskehitystä Kaliforniassa käyttämällä aineistonaan 6,4 miljoonaa lataustapahtumaa. He totesivat, että jos kotilatausta tehdään hallitsemattomasti, niin asutetut alueet tarvitsevat kaksinkertaisen kapasiteettilisäyksen teollisuuden johtimiin verrattuna, mikä johtuu latauksen kasautumisesta huippukysynnän päälle. Pohjoismaissa tilannetta pahentaa akkujen lämpötilariippuvuus (Tikka, ym., 2023). Huippukuorman kasvu on koordinoimattoman latauksen merkittävin yksittäinen seuraus jakeluverkon kapasiteetin kannalta. Anvari ym. (2022) mukaan asuinrakennusten diversiteettikerroin voi nousta jopa 0,6:een iltapäivätunneilla ilman sähköautojakin, mikä tarkoittaa sitä, että sähköauton lisääminen kasvattaa kuormitushuippua entisestään. Daneshzand ym. :n (2023) aineisto ei tue täysin edellä mainittuja tapauksia. Daneshzand ym. osoittavat empiirisesti, että todellinen koordinoimaton lataus on käytännössä lievempää kuin monet varhaisemmat tutkimukset ovat olettaneet, koska kaikki sähköauton omistajat eivät lataa päivittäin ja kotiin saapumisajat ovat luontaisesti hajautuneet usean tunnin ajalle.

Koordinoimattoman latauksen vaikutukset sähköverkon toimintaan ilmenevät jännitteen laadun heikkenemisenä, verkon komponenttien lämpölikuormituksena ja energiahäviöiden lisääntymisenä. Sähköautojen integrointi jakeluverkkoon vaikuttaa verkon vakauteen aiheuttaen jännitteen ja taajuuden epätasapainoa, harmonisia yliaaltoja sekä energiahäviöitä. Ilmiöt vahvistavat tosiaan. Esimerkiksi suurempi virta kasvattaa jännitteenalenemaa. Lisäksi harmonisten yliaaltojen aiheuttama lisälämpö

lyhentää komponenttien elinkaarta (Mastoi, ym., 2022). Myös tehohäviöt kasvavat sähköautolatauksen myötä johtimien resistiivisten häviöiden (1) neliöllisen kasvun vuoksi (Akhavan-Rezai;Shaaban;El-Saadany;& Zidan, 2012).

$$P = RI^2 \quad (1)$$

Koordinoimattoman latauksen aiheuttamia haittoja pyritään estämään ensisijaisesti siirtämällä latausta ajallisesti pois huippukulutuksen päältä matalan kysynnän tunneille. Tikka ym. (2014) onnistuivat ohjaamaan latausta edullisimmille tunneille SPOT-hintaan perustuvien tariffien avulla ja pudotti sillä viikkokuluja 0,29 eurosta 0,17 euroon. On kuitenkin huomattava, että kuormanohjausstrategialla on valtava merkitys kuormitusprofiilin muodostumiseen. Daneshzand ym. (2023) havaitsivat, että aikaporrastetut tariffit osoittautuvat verkon kannalta hankaliksi. Hinnan laskiessa kiinteään kellonaikaan kaikki verkossa olevat sähköautot voivat aloittaa latauksen samanaikaisesti, mikä luo koordinoimatonta latausta ja terävämpiä kulutuspiikkejä. Tapaus jossa tariffeja käytettiin sekalaisesti, osoittautui parhaimmaksi vaihtoehdoksi. Kun sähköautojen markkinaosuus ylitti 55 prosentin, tuottivat ne pienimmän huippukuorman kasvun verrattuna muihin tapauksiin, joissa käytettiin muita tariffeja. Tämä johtuu siitä, että eri tariffeja noudattavien käyttäjien latausajankohdat hajautuvat luontaisesti eri tunneille, mikä vähentää synkronisointumisriskiä. Lisäksi V2G:n vapauttama verkkokapasiteetti ei luo lisätuloja jakeluverkko-operaattoreille, mutta sen on huomattu ehkäisevän kuormitushuippuja, mikä on varmistanut investointien lykkäämisen. Akkuvaraston hyöty riippuu vahvasti verkon peruskuormituksesta. Lyhyillä huippukäyttöajoilla on huomattu, että jo pienellä kapasiteetilla voidaan saavuttaa merkittävää hyötyä, mutta verkon rajahyöty laskee varastokoon kasvaessa. Lopuksi latausasemien optimaalisen sijoittelun todettiin vähentävän liikenneverkkojen ja jakeluverkkojen yhteiskustannuksia. Sähköautojen saavuttaessa maksimimarkkinaosuuden, osoittavat tulokset, että latauskysynnän tukemisessa koettiin 45 %:n parannus ilman negatiivisia vaikutuksia verkkoon, jännitteen poikkeaman pysyessä alle 0,3 %:ssa, mikä on infrastruktuurin kannalta hyväksyttävää eikä aiheuta toimintahäiriöitä.

5 Johtopäätökset

Tuloksisista voidaan päätellä, että sähköautojen yleistyminen luo merkittävän haasteen jakeluverkko-operaattoreille sekä verkon toiminnalle. Ongelmana ei ole sähköautoista johtuva lisääntyvä energian tarve, vaan sähköautojen lataustapahtuma kasautuu huippukuormien päälle. Mikä tarkoittaa, että sähköautoistuminen ei välttämättä aina vaadi verkkoinvestointeja. Koordinoimaton lataus aloittaa ketjureaktion, jossa kaikki haitalliset vaikutukset myötävaikuttavat toistensa aiheuttamiin ongelmiin, mikä lopulta johtaa toimintahäiriöihin. Haitat ilmenevät suurempina sähköautojen yleistyessä.

Koordinoitu lataus tarjoaa ratkaisun ongelmiin. Pelkällä latauksen hajauttamisella pystytään vähentämään huippukuormaa. Tästä voisi päätellä, että koordinoitun latauksen hyödyt ovat saavutettavissa myös suhteellisen yksinkertaisilla ohjausmekanismeilla ilman monimutkaisia reaaliaikaisia järjestelmiä. Kysynnän ohjausta voisi mallintaa esimerkiksi ajastimella, joka käynnistyy, kun halvemmat yöhinnat alkavat. Tämän strategia voi luoda kuitenkin uuden huippukuorman yöaikaan, kun kaikki latausta odottavat sähköautot alkavat lataamaan. Paikallinen dynaaminen kapasiteetinhallinta osoittautui tehokkaimmaksi yksittäiseksi strategiaksi, mutta sitäkin kannattavampaa on käyttää useampaa tariffimallia samanaikaisesti.

V2G-teknologia ja latausasemien optimaalinen sijoittelu täydentävät näitä ratkaisuja merkittävästi. V2G mahdollistaa sähköautojen hyödyntämisen aktiivisina verkon tukikomponentteina taajuusreservimarkkinoilla ja huippukuorman leikkauksessa, kun taas latausasemien sijoittelun optimointi liikenneverkkojen solmukohtiin voi vähentää kokonaiskustannuksia ja mahdollistaa sähköautojen markkinaosuuden kasvun ilman merkittäviä verkkovahvistuksia.

Kirjallisuudesta paljastui kolme merkittävää tutkimusaukkoa, joiden huomioiminen ja tutkiminen parantaisi nykyisen tietämyksen sovellettavuutta käytännön jakeluverkon suunnittelussa. Nämä kolme aukkoa ovat aikaresoluution mittausinfrastruktuurin puute pienjänniteverkoissa, pohjoismaisen lämpötilariippuvuuden riittämätön huomiointi verkkosuunnittelussa sekä raskaan liikenteen sähköistyminen. Nämä aukot muodostavat selkeän jatkotutkimustarpeen, jonka täyttäminen on välttämätöntä jakeluverkon hallittavan sähköautoistumisen varmistamiseksi.

Tutkielmassa tarkasteltu aineisto käsittelee enimmäkseen henkilöautoja. Sähköisten kuorma- ja linja-autojen yleistyminen tulee aiheuttamaan suurempia latauspiikkejä, koska niiden akkukapasiteetti on suurempi. Raskaan liikenteen sähköistymisen vaikutukset voivat erota henkilöautoista, sillä niiden lataussyklit ja kellonajat poikkeavat täysin henkilöautoista. Lisäksi nykyisten reaaliaikaisten mittausinfrastruktuurin komponenttien kehitys edesauttaa V2G-tekniikan käyttöönottoa ja antaa jakeluverkonoperaattoreille mahdollisuuden tarjota kysynnänohjauspalveluita sähköautojen omistajille. Lopuksi pohjoismainen konteksti: Akkujen lämpötilariippuvuus näkyy verkossa lisäkuormana. Dendriittien muodostuminen aiheuttaa akun sisäisiä oikosulkuja, mikä lyhentää akkujen elinikää. Vuodenaikojen lämpötilaerojen aiheuttamasta rasituksesta akkuihin on niukasti tutkimusta.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin sähköautojen latauksen vaikutuksia jakeluverkkoon kirjallisuuskatsauksen keinoin. Tavoitteena oli selvittää, miten koordinoimaton lataus kuormittaa verkkoa, millaisia ratkaisuja koordinoitu lataus tarjoaa ja mitä tutkimusaukkoja se sisältää.

Kirjallisuus osoittaa yksimielisesti, että koordinoimaton kotilataus on jakeluverkolle merkittävä haaste. Se kasautuu iltapäivähuipulle ja kasvattaa huippukuormaa moninkertaisesti sähköautojen markkinaosuuden ollessa 100 %. Lisäksi se heikentää jännitteen laatua syöttöjohdoissa, altistaa muuntajat lämpölikuormitukselle ja saattaa aiheuttaa harmonisia yliaaltoja. Koordinoitu lataus tarjoaa konkreettisia keinoja näiden haittojen hallitsemiseksi. Dynaaminen kuormituksen hallinta sekä TOU-tariffiohjaus voivat yhdessä mahdollistaa toimintavarmuuden jopa silloin kun sähköautojen markkinaosuus on suuri ilman merkittäviä verkkovahvistuksia. Dynaamiset tariffit suoriutuvat verkon kannalta selvästi paremmin kuin aikaporrastetut vaihtoehdot, mutta tariffien samanaikainen käyttö hajautti latauksen vaikutuksia tehokkaimmin.

V2G-tekniikka ja optimaalinen latausasemien sijoitus täydentävät kokonaisuutta luomalla uuden sovellusasteen ja avaamalla mahdollisuuden hyödyntää sähköautoja aktiivisina resursseina jännitteen ja taajuuden säätämiseen.

Lähteet

- Ahmed R., A.; Aboul'fotouh, E.;& Wael A.Fatah, M. (2017). Uncoordinated vs Coordinated Charging of Electric Vehicles. *International Journal of Engineering and Information Systems*, 1(6), 54-65. Haettu 18. 05. 2026 osoitteesta <https://hal.science/hal-01580864/>
- Akhavan-Rezai, E.;Shaaban, M.;El-Saadany, E.;& Zidan, A. (2012). Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: Normal and fast charging comparison. *IEEE PES General Meeting*, (ss. 1-7). doi:10.1109/PESGM.2012.6345583
- Anvari, M.;Proedrou, E.;Schäfer, B.;Beck, C.;Kantz, H.;& Timme, M. (06. 08 2022). Data-driven load profiles and the dynamics of residential electricity consumption. *Nature communications*, 13, 2-8. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31942-9>
- Bischofberger, C. (27. 03 2023). *e-tech News & Views from the IEC*. Haettu 24. 04. 2026 osoitteesta [etech.ch: https://etech.iec.ch/issue/2023-02/helping-to-access-electric-vehicles#:~:text=One%20of%20the%20most%20advanced,is%20compatible%20with%20IEC%2062196](https://etech.iec.ch/issue/2023-02/helping-to-access-electric-vehicles#:~:text=One%20of%20the%20most%20advanced,is%20compatible%20with%20IEC%2062196).
- Butorac, S. (2025). *EU Grids*. Members' Research Service , EU. Haettu 6. 6. 2026 osoitteesta [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/772854/EPRS_BRI\(2025\)772854_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/772854/EPRS_BRI(2025)772854_EN.pdf)
- Daneshzand, F.;Coker, P.;Potter, B.;& Smith, S. (2023). EV smart charging: How tariff selection influences grid stress and carbon reduction. *Applied Energy*, 348. doi:10.1016/j.apenergy.2023.121482
- Della Giustina, D.;Pau, M.;Attilio Pegoraro, P.;Ferdinanda, P.;& Sulis, S. (2014). Electrical Distribution System State Estimation: Measurement Issues and Challenges. *EEE*

- Instrumentation & Measurement Magazine*, 36-42.
doi:DOI:10.1109/MIM.2014.6968929
- Eurostat*. (13. 5. 2026). doi:https://doi.org/10.2908/ENV_AC_AIGG_Q
- Ibrahim, R. A.;Gaber, I. M.;& ZakZouk, N. E. (2024). Analysis of multidimensional impacts of electric vehicles penetration in distribution networks. *Scientifi Reports*, 14, 21. doi:10.1038/s41598-024-77662-6
- International Energy Agency*. (2023). Haettu 3. 6. 2026 osoitteesta Electricity Grids and Secure Energy Transition: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>
- International Energy Agency*. (2025). Haettu 25. may 2026 osoitteesta Global EV outlook 2025 Expanding sales in different markets.: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVO Outlook2025.pdf#page=14.09>
- Lassila, J.;Haakana, J.;Tikka, V.;& Partanen , J. (2012). Methodology to Analyze the Economic Effects of Electric Cars as Energy Storages. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 506–516. Haettu 17. Maaliskuu 2026
- Letha, S. S.;Bollen, M. H.;Busatto, T.;Delgado, A. E.;Mulenga, E.;Bakhtiari, H.;. . . Ravindran, V. (21. Kesäkuu 2023). Power Quality Issues of Electro-Mobility on Distribution Network - An overview. *Energies*, 16(13)(4850). doi:<https://doi.org/10.3390/en16134850>
- Li, Y.;& Jenn, A. (2024). Impact of electric vehicle charging demand on power distribution grid congestion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(18). doi:10.1073/pnas.2317599121
- Mastoi, M. S.;Zhuang, S.;Munir, H. M.;Haris, M.;Hassan, M.;Usman, M.;. . . Ro, J.-S. (2022). An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports*, 8(2352-4847), 11504–11529. doi:10.1016/j.egy.2022.09.011
- Nireekshana, N.;Shiraz, S.;Divyashree, D. D.;Naaz, K.;& Soumya, S. (11 2025). A Comprehensive Survey on Electrical Distribution Systems. *International Journal*

- of Innovative Science and Research Technology*, 10(11).
doi:<https://doi.org/10.38124/ijisrt/25nov1110>
- Proedrou, E. (2021). A Comprehensive Review of Residential. 12114 - 12130.
doi:10.1109/ACCESS.2021.3050074
- Sadhu, K.; Aiello, M.; Rouhani, M.; & Haghshenas, K. (2022). Optimal joint operation of coupled transportation and power distribution urban networks. *Energy Inform*, 5(35). doi:<https://doi.org/10.1186/s42162-022-00249-w>
- Salminen, A. (2011). Mikä kirjallisuuskatsaus? *Vaasan Yliopiston Julkaisuja*. Haettu 06. 5. 2026 osoitteesta https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf
- Sanguesa, J.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.; & Marquez-Barja, J. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 376-377. doi:10.3390/smartcities4010022
- Scanoffice*. (ei pvm). Haettu 1. 5. 2026 osoitteesta Sähköauton lataus -sanasto - Ota termit haltuun: <https://scanoffice.fi/sahkoauton-latausasemat/opas/ohjeet-ja-javinkit-sahkoauton-lataukseen/sahkoauton-lataus-sanasto/>
- Sharma, G.; Sood, V.; Alam, M. S.; & Shariff, S. M. (2020). Comparison of common DC and AC bus architectures for EV fast charging stations and impact on power quality. *eTransportation*, 5. doi:10.1016/j.etrans.2020.100066
- Steinbach, S. A.; & Blaschke, M. J. (2024). How grid reinforcement costs differ by the *nature comminucations*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-024-53644-0>
- Tikka, V. (2024). *On load modeling of electric vehicles – energy system viewpoints*. Haettu 17. 03 2026
- Tikka, V.; Haapaniemi, J.; Honkapuro, S.; & Räisänen, O. (2022). Convolutional neural networks in estimating the spatial distribution of electric vehicles to support electricity grid planning. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120124>
- Tikka, V.; Henri, M.; Lassila, J.; & Partanen, J. (2014). Case Study: Smart Charging Plug-In Hybrid Vehicle Test Environment with Vehicle-To-Grid Ability. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Lappeenranta: IEE. Haettu 17. Maaliskuuta 2026

Tikka, V.;Räisänen, O.;Haapaniemi, J.;Mendes, G.;Lassila, J.;& Honkapuro, s. (2023).
Electric vehicle charging measurements in the Nordic environment – charging
profile dependence on ambient temperature. *CIREN 2023 Conference
Proceedings*. Haettu 17. 3. 2026

Liite

Liite Kodinkoneiden sähkönkulutus vuositasolla (Helen)

Laite	Kulutus	Käyttökerrat/vko	Sähkönkulutus/vuosi	Hinta*/vuosi
Astianpesukone	0,8–2,5 kWh/krt	7	292–913 kWh	58–183 €
Kiuas	5 kWh/h	1	260 kWh	52 €
Induktioliesi	0,6–1,9 kWh/30 min	7	219–694 kWh	44–139 €
Kuivausrumpu	2–6 kWh/krt	2	208–624 kWh	42–125 €
Jääkaappi	0,3–2,2 kWh/vrk	7	100–800 kWh	20–160 €
Pyykinpesukone	0,2–2,5 kWh/krt	2	21–260 kWh	4,2–52 €
Televisio, plasma	0,15–0,3 kWh/h	7	55–110 kWh	11–22 €
Televisio, LED	0,08–0,16 kWh/h	7	29–58 kWh	5,8–11,6 €