

Tuomas Patola

Sähköautojen latausjärjestelmien vaikutus sähkön laatuun

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

27.4.2015

Tekijä Otsikko	Tuomas Patola Sähköautojen latausjärjestelmien vaikutus sähkön laatuun
Sivumäärä Aika	40 sivua 27.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Projektipäällikkö Ville Eskelinen Lehtori Sampsa Kupari
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähköautoprojektin sähköautojen erinäisten latausjärjestelmien ja useamman auton yhtäaikaista vaikutusta sähkön laatuun sähköverkossa. Työn aihe tuli projektin sähköautoihin asennettavien erilaisten latausjärjestelmien ja Minna Pölläsen vuonna 2011 tekemän insinööriyön itse rakennettujen sähköautojen ja sähköautokonversioiden latauksien vaikutuksista sähkön laatuun sähköverkossa herättämistä kysymyksistä.</p> <p>Pölläsen insinööriyön aikana sähköautojen standardeja ei ollut vielä olemassa, mutta niissä ja myös tekniikassa on edistytty tätä työtä kirjoittaessa. Latausjärjestelmien on kuitenkin täytynyt noudattaa aikaisemmin yleisiä sähkön laadun standardeja.</p> <p>Projektin autoista tässä työssä mitattiin Electric RaceAbout:ia ja kahta Fiat Doblo - sähköautokonversiota, joista toista ladattiin langattomasti ja toista pikalatauksena. Autojen lataukset mitattiin ensiksi yhdessä ja sen jälkeen yksi kerrallaan. Lopuksi mitattiin pikalatauksen ja E-RA:n latauksen käynnistysvirrat.</p> <p>Mittaustulosten ja simuloinnin perusteella voitiin todeta, että vähäinen määrä sähköautoja latautumassa ei vaadi muuta kuin niiden aiheuttamaan kuorman varautumisen. Useamman sähköauton ollessa samanaikaisesti latautumassa voi tarvita jo yliaaltojen ja loistehon kompensointia.</p>	
Avainsanat	Sähköauto, lataus, sähköverkko, sähkön laatu

Author Title	Tuomas Patola Electric Vehicle Charging Systems' Impact on Power Quality
Number of Pages Date	40 pages 27 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Ville Eskelinen, Project Manager Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to study power quality when charging self-build electric vehicles in Metropolia UAS Electrical Vehicle project with different types of chargers and how multiple electric vehicles affect the power quality of electricity in the distribution network. The subject of the thesis arose from charging systems of project cars and Minna Pöllänen's thesis about Power quality in charging an electric car and questions that it raised about self-build electrical vehicles and electrical vehicle conversions, and how charging those affect the power quality of the electrical distribution network.</p> <p>Standards related to electric vehicles were still in process in 2011 when Pöllänen wrote her thesis. Now during the writing of this thesis those standards and technology about electric vehicles have advanced a lot from 2011. Nevertheless, charging systems have had to follow the general standards of power quality.</p> <p>The electric vehicles that participated in this thesis were Electric RaceAbout and two Fiat Doblo electric vehicle conversions the other of which could be charged with a quick charger and the other with a wireless charger. Electric vehicles were measured first one at the time and then all at the same time. Start-up current of quick charge and E-RA's were measured last.</p> <p>The measurement and simulation results indicate that charging of small amount of electrical vehicles does not affect significantly, but causes a need to prepare for the load they create. The need for compensation of harmonics and reactive power arises when charging multiple electrical vehicles simultaneously.</p>	
Keywords	Electric vehicle, EV, charging, power grid, power quality

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Sähköautojen standardit	2
3	Yliaallot, loisteho ja niiden kompensointi	3
3.1	Yliaallot	3
3.2	Yliaaltosuodatus	6
3.3	Loisteho ja sen kompensointi	7
4	Sähköautojen lataaminen ja akkutyypit	10
4.1	Sähköautojen lataaminen	10
4.1.1	Lataustapa 1, Kevyet sähköajoneuvot	10
4.1.2	Lataustapa 2, Tilapäinen tai rajoitettu lataus	11
4.1.3	Lataustapa 3, Sähköautokäyttöön suunniteltu lataustapa	11
4.1.4	Lataustapa 4, Sähköauton pikalataus	12
4.1.5	Langaton lataaminen	13
4.2	Akkuteknologia	16
5	Projektin autot	19
5.1	Electric RaceAbout	19
5.2	Fiat Doblo	20
6	Mittaukset	22
6.1	Mittalaite	22
6.2	Mittausmenetelmät	23
6.3	Mittaustulokset	27
6.3.1	Electric RaceAbout	28
6.3.2	Fiat Doblon CHAdeMO-pikalataus	29
6.3.3	Fiat Doblon langaton lataus	30

6.3.4	Yhteismittaus	31
6.3.5	Electric RaceAbout ja CHAdeMO-pikalatauksien käynnistyminen	32
7	Parkkihallisimulointi	33
8	Yhteenveto	37
	Lähteet	38

Lyhenteet ja käsitteet

E-RA	Electric RaceAbout, Metropolian sähköautoprojektin urheiluauto.
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization; eurooppalainen sähköalan standardointiorganisaatio
IEC	International Electrotechnical Commission; kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
ISO	International Organization for Standardization; kansainvälinen standardointiorganisaatio
SESKO	Suomen sähköteknillinen standardisoimisyhdistys
SAE	Society of Automotive Engineers; yhdysvaltalainen autoalan standardointijärjestö
CHAdeMO	Japanissa kehitetty sähköautojen pikalataus-standardi
CCS	Combined Charging System; yhdysvalloissa SAE:n kehittämä sähköautojen pikalatausstandardi
THD	Total Harmonic Distortion; harmoninen kokonaissärö

1 Johdanto

Sähköautojen yleistyessä niiden lataaminen kuormittaa sähköverkkoa merkittävästi. Nykyisien akkukapasiteettien takia autojen latauspisteiden määrän on oltava suuri ja niitä on ladattava usein. Ympäri vuorokautisen kuormituksen kasvaessa ja yhtenäisen standardin puuttuessa latausjärjestelmistä voi sähkön laatu sähköverkossa huonontua merkittävästi.

Sähkömoottoreiden puuttuessa loistehon muodostuminen on latausjärjestelmissä huomattavasti pienempää, ja sähkön laadun kannalta tärkeämpi tutkailun aihe on harmoniset ja ei-harmoniset yliaallot.

Tämä työ on jatkoa Minna Pölläsen vuonna 2011 tekemälle insinööriytyölle, jossa käsiteltiin Toyota Priukseen jälkiasennettua latausjärjestelmää ja tämän vaikutusta sähkön laatuun sähköverkossa [1].

Tämän insinööriytyön tarkoituksena on mitata ja analysoida Metropolia Ammattikoulun sähköautoprojektin sähköautojen latauksia ja niiden vaikutuksia sähkön laatuun. Insinööriytyön mittaukset on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulun sähköautoprojektin autojen latauksilla.

Tarkastelun kohteena oli Electric Race About (E-RA) ja kaksi Fiat Dobloa. Lataustekniikoina käytettiin CHAdeMO-standardin pikalatausta, Doblon langatonta latausta sekä E-RA:n kolmivaihelatausta. Työssä mitattiin latauksien vaikutusta sähköverkkoon niiden ollessa yksittäin ja samanaikaisesti päällä.

2 Sähköautojen standardit

Sähköautojen ja sähköautojen latauksien standardit kehitetään CENELEC:issä (European Committee for Electrotechnical Standardization), ja IEC:ssä (International Electrotechnical Commission). CENELEC hyväksyy standardit eurooppalaisiksi EN-standardiksi. Myös ISO (International Organization for Standardization) tekee sähköautoihin liittyviä yleisiä teknisiä standardeja.

Sähköautoihin liittyviä standardointiryhmiä:

- ISO TC 22, Road vehicles
- CEN TC 301, Road vehicles
- IEC TC 69, Electric road vehicles and electric industrial trucks
- CLC/TC 69X, Electrical systems for electric road vehicles
- IEC TC 21, Batteries
- IEC SC 23H, Plugs, socket-outlets and couplers for industrial purposes. [2; 3.]

Suomessa sähköautojen standardoinnista vastaa SESKO, jonka komitea SK 69 sähköautot ja latausjärjestelmät osallistuu standardointityöhön. Latausjärjestelmien standardoinnista vastaa IEC TC 69, ja muista sähköautossa käytettävistä komponenteista on omia komitearyhmiä. [2; 3.]

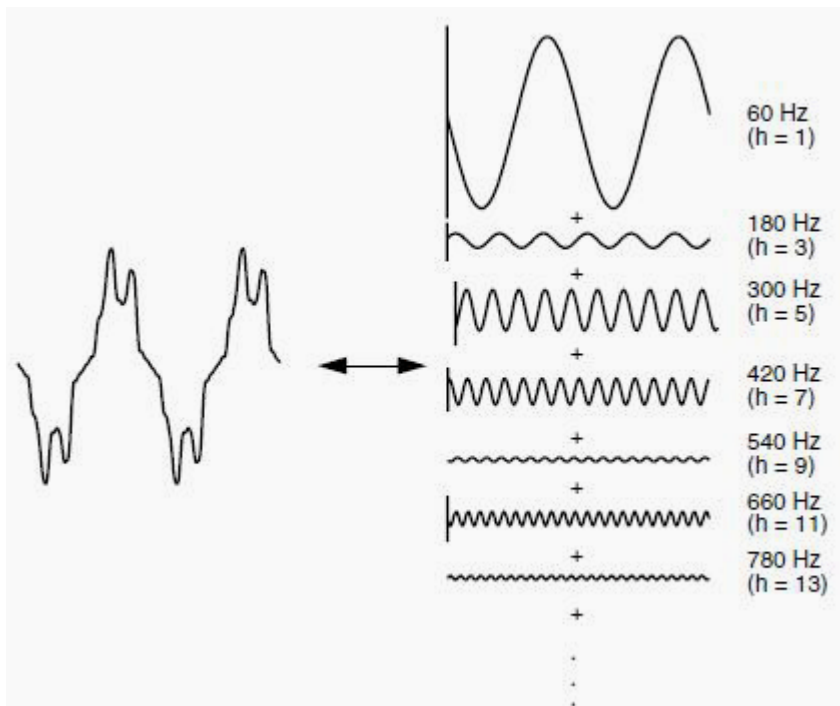
Sähköautojen latausjärjestelmien standardeja:

- IEC 61851: Latausjärjestelmä
- IEC/HD 60364-7-722: Latausaseman syöttö
- IEC 61439-7: Latauskeskus
- IEC 62196: Sähköajoneuvon pistokytin
- IEC 61980: Johdoton latausjärjestelmä. [2; 3.]

3 Yliaallot, loisteho ja niiden kompensointi

3.1 Yliaallot

Yliaaltoja aiheuttavat sähköverkkoon kytketyt epälineaariset kuormat. Epälineaarisella kuormalla tarkoitetaan laitetta, jonka käyttövirta ei ole verrannollinen syöttöjännitteeseen, esimerkiksi tehoelektronikkalaitteet, valaistus ja tietokoneet. Näiden laitteiden tasasuuntaajat ja elektroniikan komponentit synnyttävät erisuuruisia harmonisia ja ei-harmonisia yliaaltoja. Kaikkia verkon jännitteitä ja virtoja, jotka ylittävät taajuudeltaan verkon normaalin taajuuden (Suomessa 50 Hz), kutsutaan yliaalloiksi. Yleisimpiä yliaaltoja ovat kolmas, viides, seitsemäs ja yhdestoista yliaalto. Nämä ovat verkkotaajuuden monikertoja, kolmannen yliaallon taajuus on 150 Hz, viidennen 250 Hz ja niin edelleen. Kuvassa 1 on havainnollistettu Fourier-sarja harmonisista yliaalloista 60 Hz:n sähköverkossa. [4; 5.]



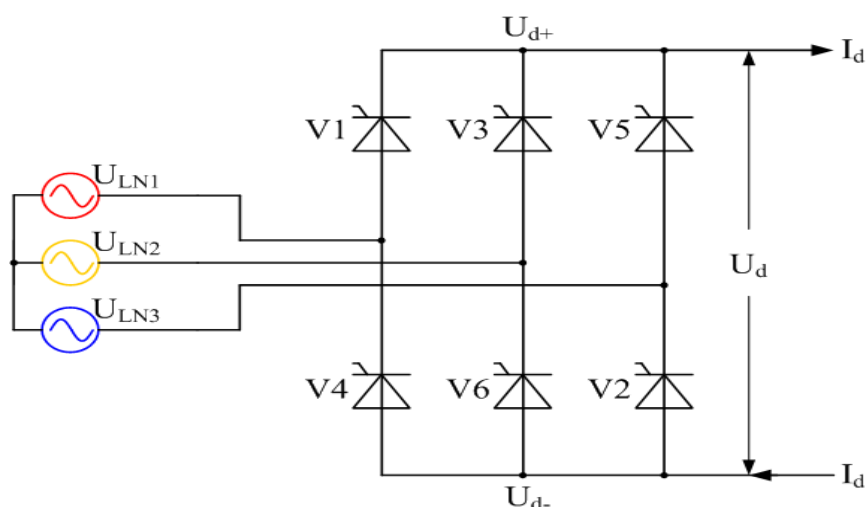
Kuva 1. Fourier-sarja harmonisista yliaalloista 60 Hz:n sähköverkossa. [6.]

Eniten ilmenevä ja haittavaikutuksiltaan suurin on kolmas yliaalto, jota on myös vaikein suodattaa. Kolmatta yliaaltoa aiheutuu erityisesti 1-vaiheisista laitteista. Kolmannen yliaallon aiheuttama kuormitus summautuu nollajohtimeen, jolloin se saattaa olla jopa 2-3 kertainen normaaliin kuormitusvirtaan verrattuna. Lisäkuormitusta nollajohtimeen aiheuttaa kolmivaihejärjestelmän epätasainen vaihekuormitus; tätä kutsutaan vinokuormitukseksi. Vanhempien kiinteistöjen sähköverkoissa nollajohdin on saatettu mitoittaa vaihejohtimia pienemmiksi. Nollajohdinta ei yleisesti suojata sulakkeella, jolloin sen ylikuormittuminen aiheuttaa tulipalovaaran. [4.]

Yliaaltojen aiheuttamat haittavaikutukset sähköverkossa:

- Nollajohdin on virrallinen symmetriselläkin kuormituksella. Yliaaltainen virta aiheuttaa nollajohtimelle lisäkuormitusta ja kasvattaa häviöitä.
- Televerkkoon muodostuu häiriöitä yliaalloista johtuvista magneettikentistä.
- Muuntajien kuormitettavuus pienenee.
- Yliaalloille herkät laitteet voivat toimia virheellisesti (tasasuuntaajat).
- Tietokoneiden näyttöjen ja muiden päätelaitteiden kuva värisee.
- Yliaaltovirrat voivat aiheuttaa resonointia kompensointi kondensaattoreihin josta seuraa niiden ylikuormittuminen. [4.]

Sähköautojen akkujen latauksessa käytettävät tasasuuntaajat aiheuttavat eri määrän yliaaltoja riippuen niiden pulssiluvusta. Pulssiluvulla tarkoitetaan tasasuuntaajassa olevien diodien tai tyristorien määrää. Kuvassa 2 on 6-pulssisen tyristoreilla toteutetun tasasuuntaajan kytkentäkaavio. [7.]



Kuva 2. Tyristoreilla toteutettu 6-pulssinen tasasuuntaaja. [7.]

Suuremmalla pulssiluvulla olevat tasasuuntaajat aiheuttavat vähemmän yliaaltoja kuin pienemmällä pulssiluvulla olevat. Pikalatauksissa olevat kolmivaiheiset tasasuuntaajat eivät juurikaan aiheuta kolmansia yliaaltoja. Yliaaltovirtojen suuruus on riippuvainen kuormituksen määrästä ja verkon impedanssista kyseisen yliaallon taajuudella. Huonosti tehty loistehon kompensointi saattaa aiheuttaa yliaaltojen resonoimisen kompensointiparistojen kanssa. [4; 8.]

Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa jännitteen säröytymistä. Jännitesäröt voivat aiheuttaa ylimääräisiä nollakohtia tai muutoksia niihin. Tämä saattaa sekoittaa nollakohtia tarkkailevia elektronisia laitteita, esimerkiksi kelloja, puolijohdekytkimet ja katkaisijat. Katkaisijoissa virran särö saattaa vaikuttaa sen katkaisukykyyn, mikäli särö on katkaisukohdalla suuri. Yliaalloilla on myös heikentävä vaikutus laitteiden ja järjestelmien tehokertoimeen. Jännitesärö ilmoitetaan Total Harmonic Distortion eli THD-arvona, joka on prosenttiluku yliaaltokomponenttien suuruuden suhteesta normaaliin sinimuotoiseen aaltoon. [4; 5.]

Standardi SFS-EN 50160 antaa jännitteen yliaalloille (taulukko 1) sallitut arvot. Harmonisten yliaaltojen tehollisarvon tulee olla 10 minuutin keskiarvoista laskettuna viikon aikana 95 prosenttisesti taulukon 1 mukaisissa rajoissa. Harmoninen kokonaissärö THD saa olla enintään 8 %. [9.]

Taulukko 1. Standardin SFS-EN 50160 määrittämät yliaaltojen sallitut arvot. [9.]

Parittomat yliaallot kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
Järjestysluku n	Yliaaltojännite %	Järjestysluku n	Yliaaltojännite %	Järjestysluku n	Yliaaltojännite %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

3.2 Yliaaltosuodatus

Sähkön laadun parantamiseksi yliaaltoja voidaan suodattaa. Jännitesärön pienentyminen vähentää sähköverkkoon kytkettyjen laitteiden häiriöitä ja sitä kautta mahdollisuutta niiden vaurioitumiselle. Yliaaltojen suodatus voidaan toteuttaa estokelaparistoilla tai yliaaltosuodattimilla. Suodatinlaite tulee valita kohteen ja sähköverkon mukaisesti. [8.]

Kuvasta 3 ilmenee yliaaltosuodattimen peruskomponentit ja rakenne. Kondensaattoriyksikkö mitoitetetaan loistehon ja yliaaltojen kompensoinnin tarpeen mukaan. Kuristimen inductanssi mitoitetetaan muodostamaan pieni sarjaresonanssipiiri kondensaattoreiden kanssa, jolloin yliaalto suodattuu pois. Suodattimia voidaan ohjata loistehonsäätimellä tai kuormien ohjaustiedoilla.



1 Lämpörele | 2 Kontaktori | 3 Kela | 4 Kondensaattorit

Kuva 3. ABB:n pienjänniteverkon yliaaltosuodatin. [10.]

Tyypillisesti yliaaltosuodattimen sarjaresonanssipiiri on mitoitettu yleisimpien yliaaltojen mukaisesti (5., 7. ja 11.), jokaiselle yliaaltotaajuudelle on mitoitettu oma sarjaresonanssipiiri suodattamaan kyseistä yliaaltoa. Suodatin voidaan rakentaa osaksi keskusta tai omaksi kokonaisuudeksi. Suodatin voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti vakiokomponenteista. [4.]

Kolmatta yliaaltoa ei voida suodattaa samalla tavalla imupiiirillä kuin 5., 7. ja 11 yliaaltoja. Yleisesti kolmatta yliaaltoa suodatetaan estopiiirillä, joka toteutetaan kytkemällä suodatin sarjaan nollajohtimen kanssa. Suodatin on mitoitettu 150 Hz:n rinnakkaisresonanssipiiirillä, joka estää kolmannen yliaallon aiheuttaman virran kulkemisen nollajohtimessa. [4; 11.]

3.3 Loisteho ja sen kompensointi

Loisteho on reaktiivisen kuorman aiheuttamaa tehoa, joka aiheutuu kuormassa olevasta induktanssin ja kapasitanssin epätasapainosta. Loisteho ei ole niin sanottua työtä tekevää tehoa, vaan jää kuormittamaan verkkoa kuorman ja siirtoverkon kojeiden välille. Loistehoa on kapasitiivista ja induktiivista, mutta yleisesti loistehosta puhuttaessa tarkoitetaan induktiivisen kuorman aiheuttamaa loistehoa. [11.]

Induktiivista loistehoa syntyy sähkölaitteissa olevista keloista ja käämeistä, esimerkiksi sähkömoottoreiden käämityksistä. Kotisähköverkkojen loisteho määrät ovat yleensä niin pieniä, että sähköverkkoyhtiöt eivät vaadi niiden kompensointia. Sähköverkkoyhtiöt mittaavat loistehoa, ja veloittavat sen käyttöä suuremmissa sähköliitymissä, kuten varastot, tehtaot ja mahdollisesti tulevaisuudessa sähköautojen latausasemat. Loistehon määrän ollessa suuri sen kompensointi saattaa olla taloudellisesti kannattavaa. [11.]

Loistehon aiheuttamat ongelmat käyttäjille:

- Loistehon aiheuttamat häviöt pienentävät verkon kykyä siirtää pätötehoa.
- Liittymismaksu ja perusmaksu suurenevat suuremman pääsulakevaatimuksen myötä.
- Suuremmissa liitymissä verkkoyhtiö veloittaa kompensoimattomasta loistehosta.
- Loppukäyttäjät maksaa kulutetusta näennäistehosta, eli sähkölasku kasvaa.
- Siirtokyvyn lisäämisen aiheuttamat investoinnit näkyvät siirtomaksuissa. [11.]

Loistehon aiheuttamien häviöiden ja kuormituksien takia sen siirtäminen ei ole kannattavaa. Loistehon kompensointi on järkevää suorittaa lähellä sen syntymispistettä. Yleisin tapa kompensoida loistehoa on sijoittaa kompensointiyksikkö pääkeskuksen lähis-
tölle. [11.]

Yleisimmät loistehon kompensointilaitteet:

- Estokelaparistot
- Kondensaattoriyksiköt
- Rinnakkais- tai sarjakondensaattoriparistot
- Reaktori
- Staattinen kompensointilaite
- Tyristorikytketty kondensaattoriparisto
- Yliaaltosuodatin
- Pyörivät kompensointilaitteet. [11.]

Estokelalla suojattuja kondensaattoreita eli estokelaparistoja voidaan käyttää suojaamaan pienissä määrin myös yliaaltoja. Kuvassa 4 näkyy estokelaparisto yksinkertaisuudessaan. [11.]



Kuva 4. ABB:n estokelaparisto. [12.]

Loistehonkompensointi tapahtuu rinnakkaiskompensoinnilla. Tämän takia on tarkkailtava kompensoitavan verkon yliaaltopitoisuutta resonoinnin välttämiseksi. Rinnakkaiskompensointi toteutetaan asentamalla kompensointilaite kuorman rinnalle. Yliaaltojen ilmetessä on syytä käyttää yliaaltoja suodattavaa kompensointiyksikköä kuten estoke-

lapanistoja. Kompensointiparistoiden käydessä tyhjänä ne aiheuttavat ylijännitettä jakeluverkkoon ja ongelmia jakeluverkkoyhtiölle. Tämän takia on suositeltavaa käyttää automaattisesti säätyviä kompensointiyksiköitä. [13.]

Loistehon kompensoinnilla saavutettavat hyödyt:

- Kokonaisvirta pienenee, tällöin verkon voi mitoittaa pienemmäksi.
- Loistehomaksut vähenevät.
- Sähköjohtojen tuottama lämpö vähenee.
- Jännitteenalenemat pienenevät.
- Voidaan ottaa pienempi sähköliitymä. [13.]

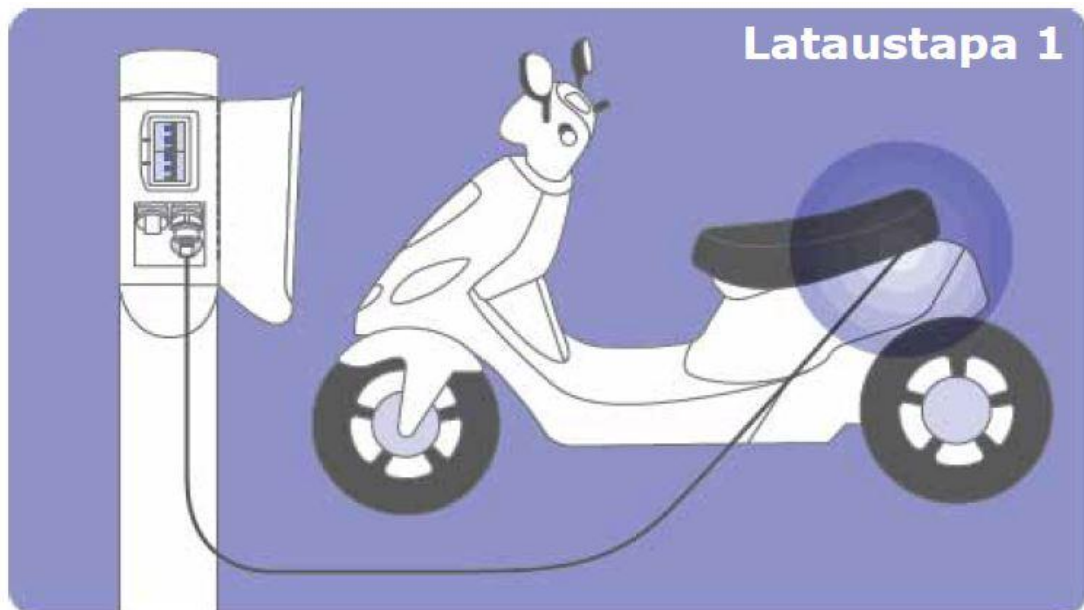
4 Sähköautojen lataaminen ja akkutyypit

4.1 Sähköautojen lataaminen

Sesko ry eli Sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardisoimisjärjestö on tehnyt eurooppalaisen standardisointijärjestöjen julkaisun, standardin EN 61851-1 mukaisen suosituksen sähköajoneuvojen lataamisesta kiinteistöiden sähköverkosta. Sähköajoneuvojen lataustapa liitännäjohtolla on standardisoituna neljä kappaletta. Näiden lisäksi lataaminen on mahdollista myös langattomasti, valmisteilla olevan standardisarjan IEC 61980 mukaisesti. [14.]

4.1.1 Lataustapa 1, Kevyet sähköajoneuvot

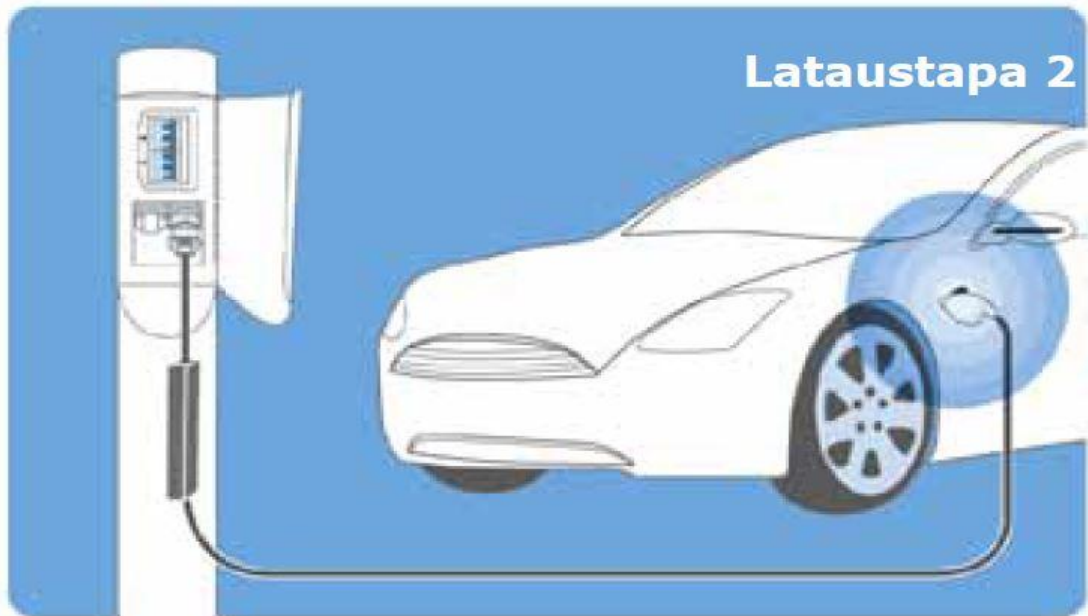
Sähköskootterit ja muut kevyet pienitehoiset sähköajoneuvot voidaan ladata tavallisesta maadoitetusta ja vikavirtasuojatusta 1-vaihepistorasiasta (16 A / 250 V). Kuvassa 5 on havainnollistettu kevyen sähköajoneuvon lataustapa. [14.]



Kuva 5. Lataustapa 1 [14.]

4.1.2 Lataustapa 2, Tilapäinen tai rajoitettu lataus

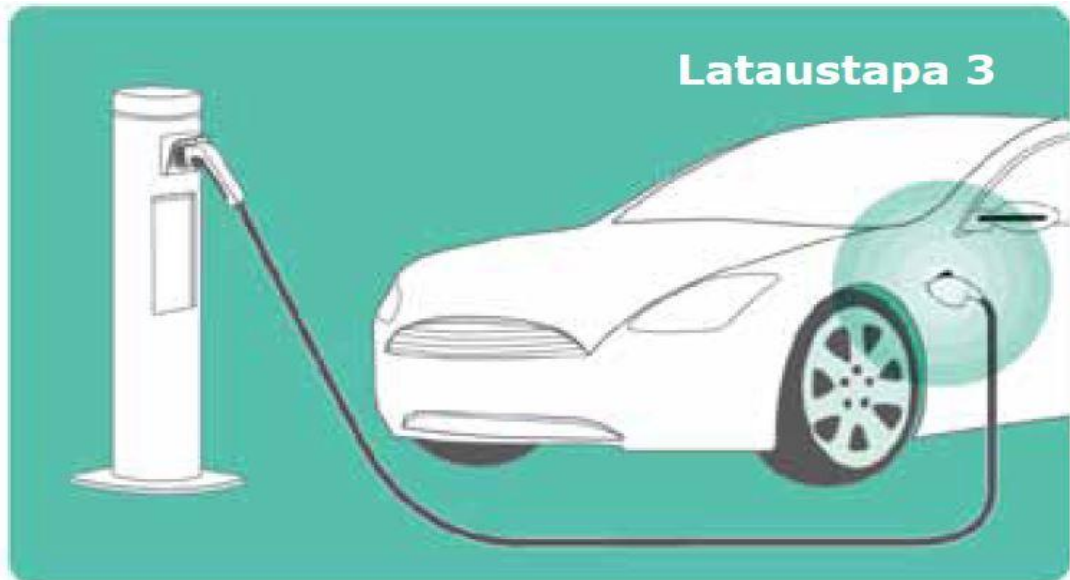
Ensimmäistä lataustapaa suurempitehoisien sähköajoneuvojen lataaminen ajoneuvon valmistajan omalla latauskaapelilla jonka voi kiinnittää tavalliseen maadoitettuun 1-vaihepistorasiaan tai 3-vaihepistorasiaan (16 A / 32 A). Kuvassa 6 on havainnollistettu tilapäinen sähköauton lataustapa. [14.]



Kuva 6. Lataustapa 2 [14.]

4.1.3 Lataustapa 3, Sähköautokäyttöön suunniteltu lataustapa

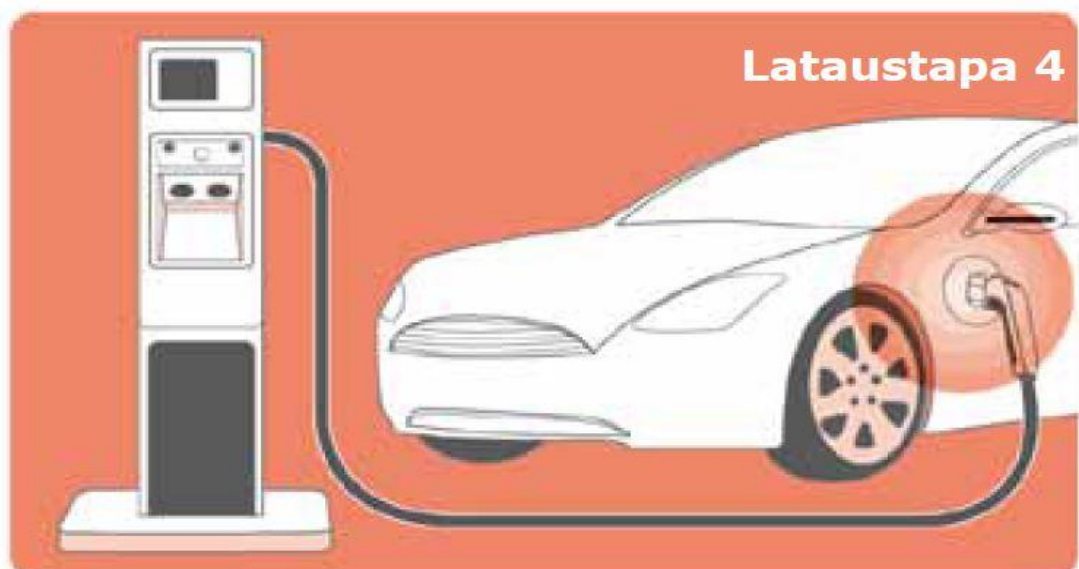
Eryyisesti sähköautoja varten suunniteltu lataustapa, Standardin IEC 62196-2 mukainen sähköautopistokkeella varustettu latausjohto, joka on joko kiinteästi latauspisteessä tai irrotettava. Latauspistettä voi syöttää yksi- tai kolmivaiheisena 63 A:n virralla. Edellä mainittu standardi sisältää kolme erilaista pistoketta. Kuvassa 7 on havainnollistettu sähköautokäyttöön suunniteltu lataustapa. [14.]



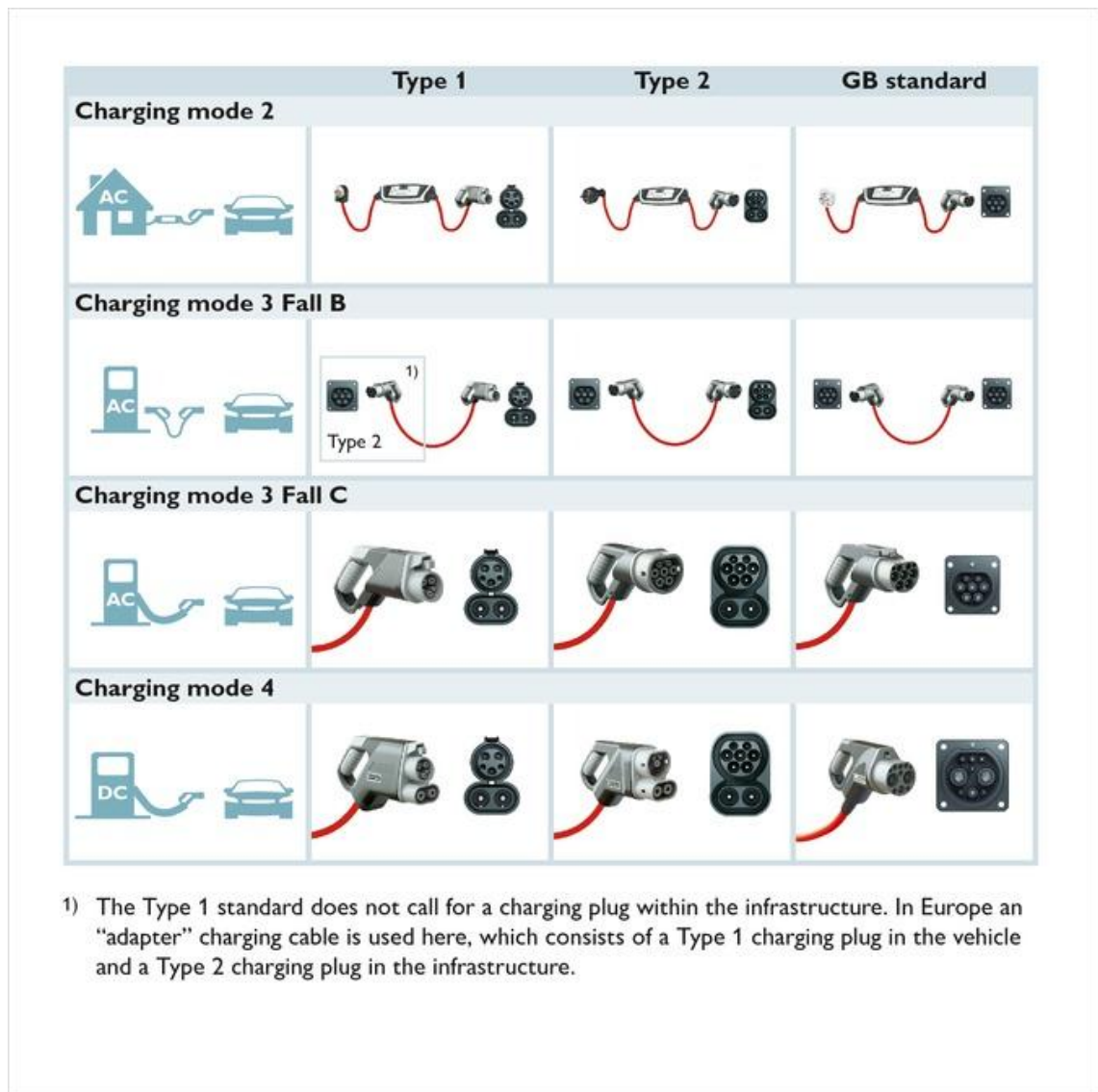
Kuva 7. Lataustapa 3 [14.]

4.1.4 Lataustapa 4, Sähköauton pikalataus

Pikalatauksella lataus suoritetaan suurella tasasähkövirralla. Latauksen liitäntäjohto on tässä latauksessa kiinnitetty kiinteästi latauspisteeseen. Kuvassa 8 on havainnollistettu sähköauton pikalataus. Liitäntäjohtoon ja auton kiinnitystä koskeva standardissa IEC 62196-3 mainitaan kolme eri liitäntätapaa. Nämä tavat ovat japanilainen CHAdeMO, kaksi eri Combined Charging System (CCS) liitintä, yhdysvaltalainen Yazaki eli Combo 1 ja Mennekesin liitin eli Combo 2 (kuva 9). [14; 15.]



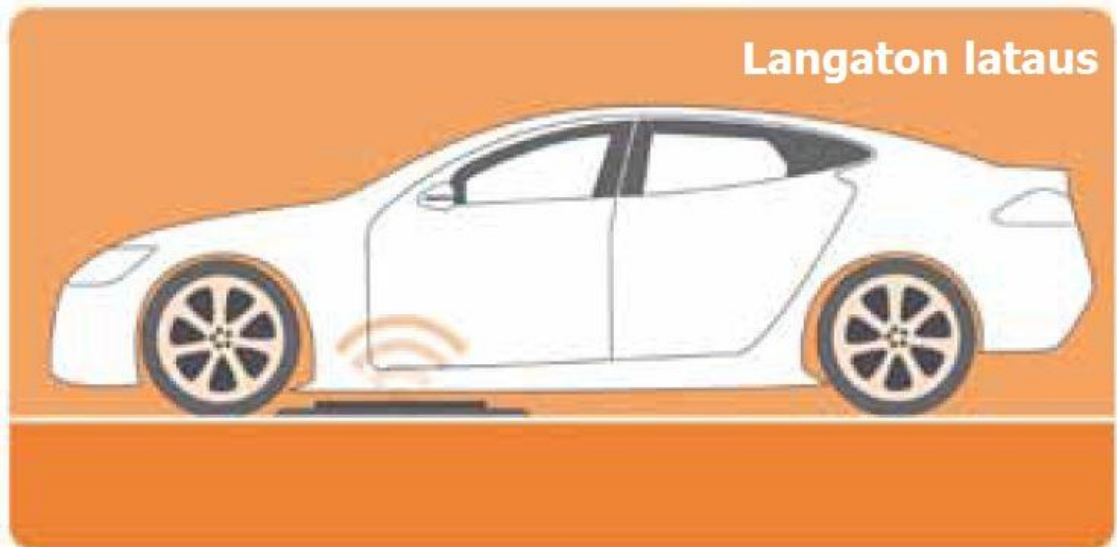
Kuva 8. Lataustapa 4 [14.]



Kuva 9. Käytössä olevat latauspistokkeet [16.]

4.1.5 Langaton lataaminen

Sähköajoneuvoja voidaan ladata esimerkiksi induktioperiaatteella ilman ajoneuvon ja sähköverkon välille liitettävää liitäntäjohtoa. Induktiovastaanotin voi olla esimerkiksi sähköauton pohjassa tai rekisterikilvessä. Kuvassa 10 on havainnollistettu langaton lataustapa. [14.]



Kuva 10. Langaton lataus [14.]

Lataustavat voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan niiden keston mukaan. Nämä luokat ovat hidas, puolinopea ja pikalataus. Taulukossa 2 on pohjoisamerikkalaisen standardin SAE Standard J1772 luokittelu muunnettuna suomalaiseseen sähköverkkoon sopivaksi. [14.]

Taulukko 2. Sähköautojen lataustavat. [17.]

	Tehotasot	Laturin sijainti	Latauspaikka	Virta	Latausaika
Lataustapa 1	Hidas 230 V AC	Autossa Yksivaiheinen	Kotona tai työpaikalla	< 16 A	4 - 11 h
Lataustapa 2	Puolinopea 400 V AC	Autossa Yksi- tai kolmivaiheinen	Yksityinen tai julkinen	< 32 A	2 - 6 h
Lataustapa 3	Pika 208-600 V AC tai DC	Auton ulkopuoleinen Kolmivaiheinen	Kaupallinen (vrt. polttoaine)	80 - 160 A (DC)	0,2 - 1 h

Laturi voi sijaita autossa (On-board) tai latauspisteellä (Off-board). On-board-latureiden täytyy olla pieniä ja kevyitä, jotta ne mahtuvat auton sisälle. Koon ja kustannuksien aiheuttamien rajoitusten takia on-board-laturien on vaikea saavuttaa korkeaa tehota- soa ja sähkön laatua. On-board-latauksille tarkoitetuille pysäköintialueiden suunnitte- lussa tulee huomioida niiden aiheuttamat yliaallot. Off-board-laturit ovat yleensä pikala- tauksia, tällöin ne ovat suuria polttoasemien pumppujen näköisiä kokonaisuuksia. Näissä teho siirretään tasavirtana (DC) sähköautoon. Kuvassa 10 näkyy Metropolian sähköauto Electric RaceAbout Fortumin keilaniemessä sijaitsevien latauspisteiden edessä. [17.]

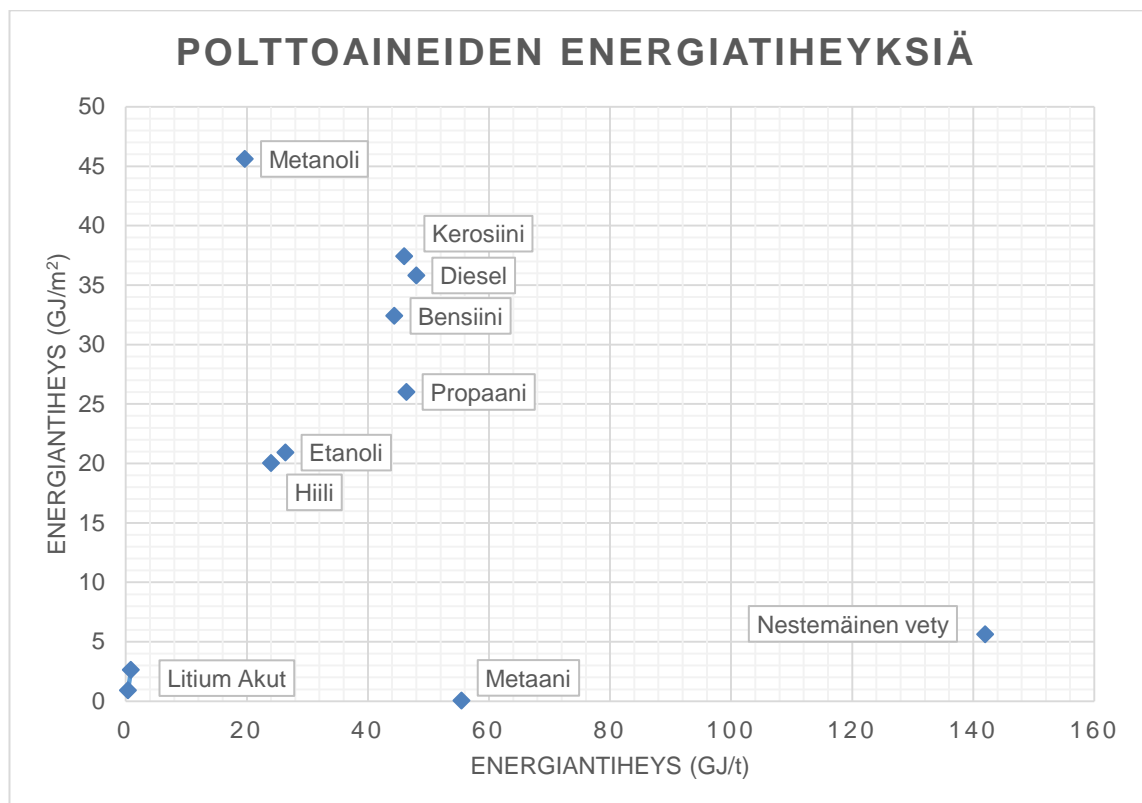


Kuva 10. Keilaniemessä sijaitseva Fortumin sähköauton latauspiste. [18.]

Sähköajoneuvoille tarkoitettujen latausasemien määrä lisääntyy Suomessa jatkuvasti. Sähköisen liikenteen verkkosivujen mukaan Suomessa on 144 kpl latausasemia, joista noin puolet sijaitsee pääkaupunkiseudulla. Sähköauton lataaminen on tällä hetkellä vielä ilmaista, mutta vaatii rekisteröitymisen ja latauskortin aktivoimisen. [19.]

4.2 Akkuteknologia

Suurin haaste sähköautojen akkuteknologiassa on akkujen heikko energiantiheys perinteisiin polttoaineisiin verrattuna. Energiatiheys kertoo, kuinka paljon energiaa saadaan varastoitua ajoneuvon polttoainesäiliöön, eli kuinka pitkän matkan ajoneuvo voi kulkea yhdellä tankkauksella/latauksella. Kuvassa 11 on määritelty eri polttoaineiden energiantiheksiä. Kuvan perusteella voi huomata, että nykyinen akkuteknologia on huomattavasti jäljessä energiantiheudessa verrattuna perinteisiin polttoaineisiin, kuten bensiiniin ja dieselöljyyn. [17.]

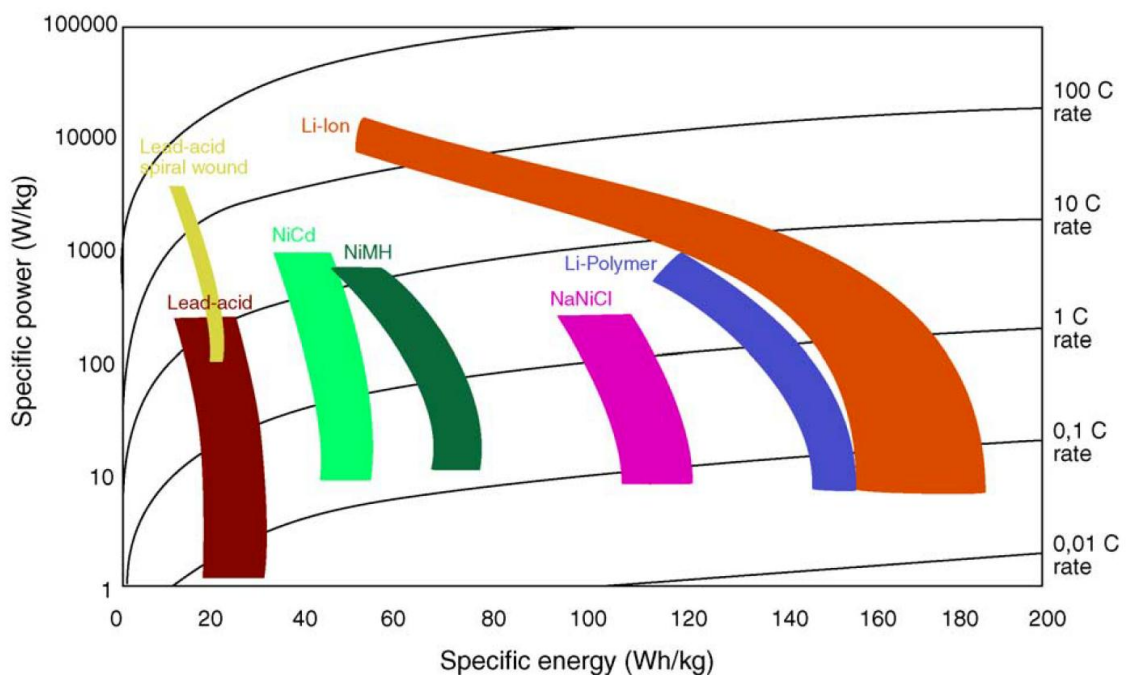


Kuva 11. Akkujen ja perinteisten polttoaineiden energiantiheksiä. Pystyakselilla on energiantiheys gigajoulea kuutiometrissä ja vaaka-akselilla on energiantiheys gigajoulea tonnia kohden. [20.]

Akkujen vanhentuminen aiheuttaa toisen suuren haasteen, joka rajoittaa niiden käyttöä. Vanhentuminen voidaan määrittää kahdella tavalla, lataussykliin määrän tai kalenterivanhentumisen mukaan. Vanhentuminen lataussykliin mukaan kertoo, kuinka monta kertaa akun voi purkaa ja ladata uudestaan, kun kalenterivanhentuminen tarkoittaa akun elinikää kalenterivuosisissa. Akkujen purkautuessa käytössä niiden jännite laskee tiettyyn kynnyksarvoon, jolloin akunhallintajärjestelmä tulkitsee akun tyhjäksi. Akkujen purkaus- ja lataamiskertojen määrien vaikutus akun elinikään riippuu purkaus- ja la-

taulosuhteista. Sähköajoneuvojen akut purkautuvat ja latautuvat erittäin vaihtelevissa olosuhteissa, mikä vaikuttaa lyhentävästi akkujen käyttöikään. [17.]

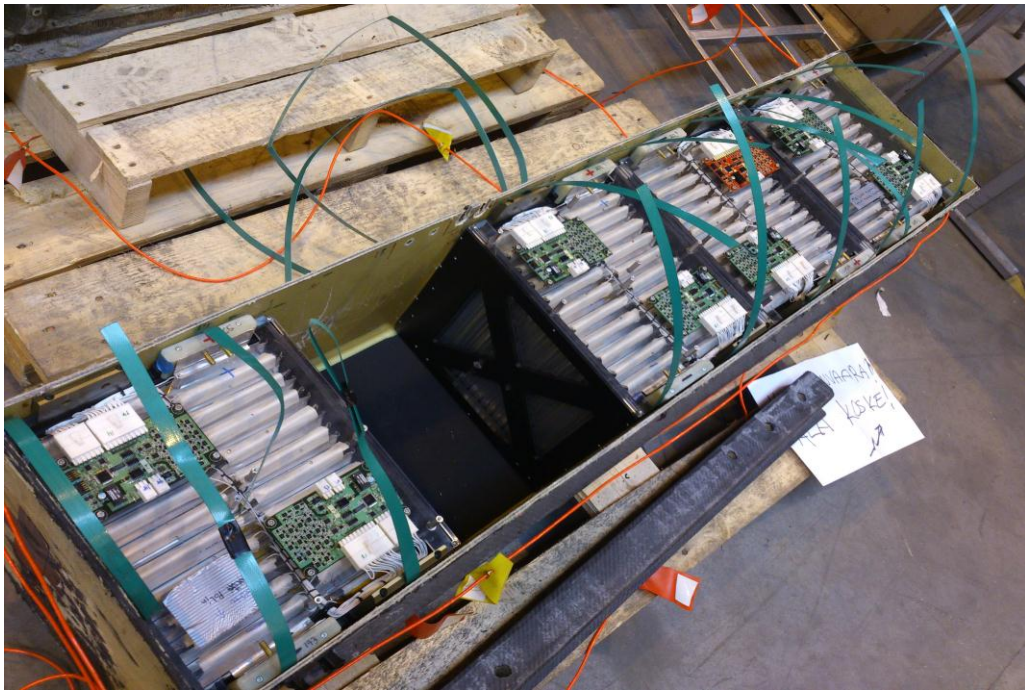
Kuvassa 12 on vertailtu nykyisiä akkutyyppejä. Vaaka-akseli kuvaa energiatiheyttä ja pystyakseli tehottiheyttä. Toisella pystyakselilla näkyy akkujen C-arvo eli akun virran ja varauksen suhde, joka kertoo, kuinka suurella virralla akkua voidaan ladata tai purkaa. Kuvan alueet esittävät akkutyypin tapoja toteuttaa kyseinen kemiallinen pari. [21; 22.]



Kuva 12. Akkutyypin vertailu. Vaaka-akselilla energiatiheys ja pystyakselilla tehottiheys sekä C-luku. [22.]

Sähköajoneuvojen käytetyimmät akkutyypit ovat nikkelimetallihybridiaakku (Ni-MH) ja litiumioni akut (Li-ion). Edellä mainituista akkutyypeistä on useita eri variaatioita kuten esimerkiksi litium-rautafosfaatti (LiFePo), joiden käyttötarkoitukset vaihtelevat hyvästä energian varastointikyvystä suureen energian luovutuskykyyn tai hyvään energian ja painon suhteeseen. Käytetty akkutyypin vaihtelee sähköajoneuvojen valmistajan ja käyttötarkoituksen mukaan. [23.]

Akkupaketit koostuvat useista kennoista. Kuvassa 13 näkyy yksi Electric RaceAboutin kolmesta akkupaketista. Kuvan akkupaketissa on viisi kennomoduulia ja yhdessä moduulissa on 12 kennoa kytkettynä sarjaan. [24.]



Kuva 13. Electric RaceAboutin akkupaketti.

5 Projektin autot

5.1 Electric RaceAbout

Electric RaceAbout on Metropolia Ammattikorkeakoulun sähköurheiluautoprojekti, joka on tehty yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Lahden ammattikorkeakoulun kanssa. E-RA-projekti on toteutettu pääosin opiskelijoiden työpanoksella. Kuvassa 14 näkyy E-RA Metropolia Ammattikorkeakoulun hallissa.



Kuva 14. Electric RaceAbout Metropolia Ammattikorkeakoulun hallissa.

Electric RaceAboutissa on hiilikuidusta tehty itsekantava kori, jonka paino on 150 kg. Auton moottoreina toimii neljä kappaletta kestopagneettitahtimoottoria, jotka on sijoitettu auton keskelle. Moottorit ovat suoraan akseleiden päissä, joten vaihteistoja ei tarvita. Moottorit pyörittävät renkaita noin 2 400 rpm, jolloin huippunopeudeksi saadaan yli 260 km/h. Kesäkuussa 2014 E-RA ajoi huippunopeudekseen 285 km/h. Nokian Hakkapeliitta-nastarenkailla on saavutettu Ukonjärven jäällä 260 km/h. [24.]

Vuonna 2010 Electric RaceAboutin 33 kWh:n akkupaketilla pystyi ajamaan noin 200 km pituisen matkan 100 km/h keskituntinopeudella. Tämä todistettiin dynamometrillä ja

Chryslerin testiradalla (ovaali) Michiganissa. E-RA:n nykyinen akkupaketti koostuu 220 akkukennosta, joiden kokonaiskapasiteetti on 48,8 kWh. Teoriassa akkupaketista voidaan ottaa ulos jatkuvana virtana 12 C ja hetkellisesti 15 C, nämä kuitenkin nostavat kennojen lämpötilaa. Isoin testattu ulos otettu virta on noin 1000 A:ia ja sisään jatkuvana 3 C. Akkupaketti voidaan ladata tyhjästä täyteen 3-10 tunnissa riippuen laturien määrästä. Electric RaceAboutin latausjärjestelmä koostuu kolmesta Brusar NLG5 3k3 kW-laturista. Yksi laturi on asennettuna kiinteästi autoon ja kaksi toimii lisälatureina. E-RA voidaan ladata hitaasti yhdellä laturilla tai pikalatauksena kolmen laturin voimin. Moottoreita ohjaa Semikronin ja Visedon taajuusmuuttajat. [24.]

Projektin aikana Electric RaceAbout on rikkonut monia ennätyksiä ja saanut paljon mainetta niin Euroopassa kuin USA:ssa. Vuonna 2010 E-RA osallistui X-Prize-kilpailuun ja saavutti toisen sijan. Seuraavan vuonna E-RA saavutti voiton Challenge Bibendum E-Rally-kilpailussa Berliinissä. Voiton lisäksi E-RA palkittiin Prototyyppi & Konsepti-suunnittelu ja Ympäristö-palkinnoilla. [24.]

5.2 Fiat Doblo

Metropolian Ammattikorkeakoulun sähköautoprojektiin kuuluu kaksi Fiat Dobloa. Fiat Doblo-projektissa muunnettiin kaksi Italiassa jälkiasennuksena tehtyä Fiat Doblo-sähköautoa suomalaisella tekniikalla toimivaksi sähköautoksi. Autoista poistettiin ajonhallintalaitteita ja moottoria lukuunottamatta kaikki sähköiset osat ja rakennettiin uudestaan.

Fiat Dobloissa akkujen hallintajärjestelmä suunniteltiin Electric RaceAboutin pohjalta ja akkupakettina toimii European Batteriesin toimittamat kennot. Akkupaketti on rakennettu litium-rautafosfaattikennoista, ja täyteen ladattuna niissä on 28 kWh energiaa. Akkujen ollessa täynnä niillä voi ajaa noin 100 km matkan. [25.]

Kuvassa 15 näkyy langattomalla latauksella varustettu Fiat Doblo. Perinteinen rekisterikilpi on korvattu langattoman latauksen induktiolevyllä, johon on kiinnitetty muovinen rekisterikilpi, joka mahdollistaa langattoman latauksen.



Kuva 15. Fiat Doblo Hernesaassa Metropolian Ammattikorkeakoulun hallissa.

Fiat Dobloissa on asennettuna kolme eri lataustapaa. Molemmissa on Defan hidaslataus ja CHAdeMO-pikalataus. Ensimmäisessä Doblossa on Kostalin valmistama langaton lataus, ja toiseen on tätä insinööriyötä tehdessä suunnitteilla Evatranin valmistama. Kostalin latausjärjestelmän lataaminen on toteutettu rekisterikilpeen asennetulla induktio kelalla, ja se käynnistyy automaattisesti, kun sähköauto on ajettu latauspisteeseen ja virta sammutetaan. Evatranin latausjärjestelmä on suunniteltu siten, että se asennetaan auton pohjaan, ja induktiolevy laskeutuu sähköauton pysähtyessä latauspisteen päälle, jolloin lataus käynnistyy.

Lyhyesti Metropolia Ammattikorkeakoulun sähköautoprojektit ovat erinomaisia tekniikasta kiinnostuneille sähkö- ja autotekniikan insinööreille, joilla on kiinnostusta moderniin tekniikkaan ja intoa toteuttaa koulussa opittua teoriaa käytännössä. [25.]

6 Mittaukset

6.1 Mittalaite

Sähkön laadun mittaukset toteutettiin Fluken 434 -energia-analysaattorilla, johon on päivitetty ohjelmisto vastaamaan versiota 435. Mittarin logger-toiminnon avulla mitattavat jännite, virta, tehot (W, var, VA), tehokerroin, vaihekulma, välkyntä, epäsymmetria, taajuus ja harmoniset arvot tallentuivat muistiin. Mittari tallensi automaattisesti mitattujen arvojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot. [26.]

Fluke voidaan kytkeä usealla eri tavalla sähköverkkoon, riippuen verkon kytkennästä. Yleisimmät kytkentätavat ovat 1-vaihekytkentä, jossa mittapäätt kiinnitetään mitattavaan vaiheeseen ja nollajohtimeen. 3-vaihekytkennässä on kolmio- ja tähtikytkentä, jossa tähteen kytkettynä mittapäätt kytketään jokaiseen vaiheeseen ja nollajohtimeen. Kolmiokytkennässä mittapäätt jätetään kytkemättä nollajohtimeen. [26.]

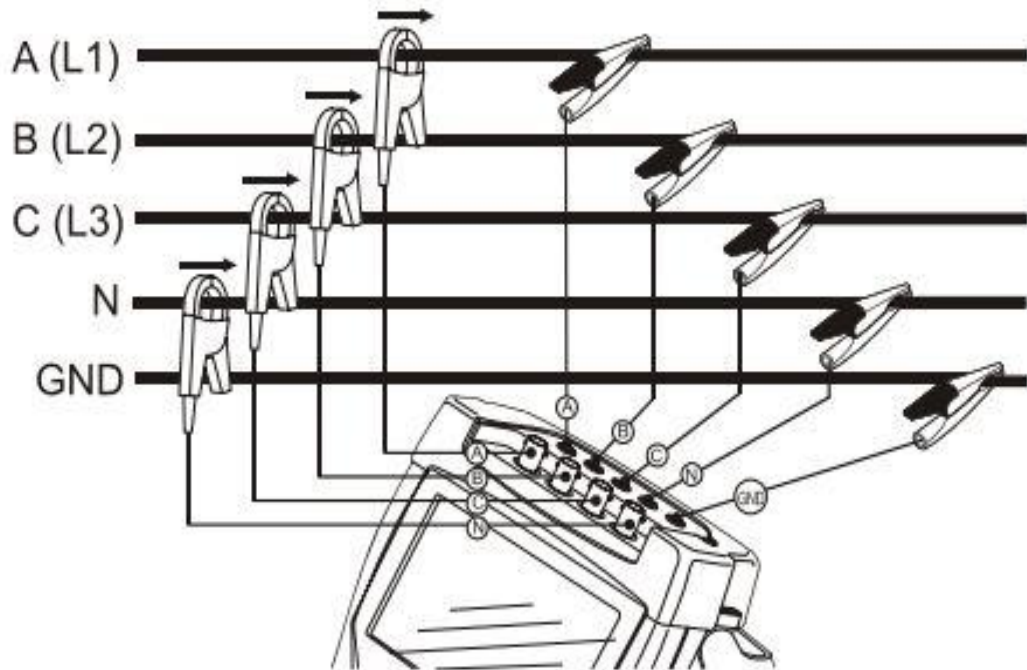
Kuvassa 16 on Fluke 434 energia-analysaattori, jossa on kiinni neljä pihtimittaria (L1, L2, L3 ja nolla) ja viisi hauenleukaliitintä (L1, L2, L3, nolla ja maa).



Kuva 16. Fluke 434 -energia-analysaattori. [26.]

6.2 Mittausmenetelmät

Mittaukset suoritettiin kytkemällä Fluken 434 -energia-analysointilaite 3x63A:n sähkökeskukseen. Keskuksista poistettiin muu kuormitus mittauksen ajaksi, ja mittarin käyttövirta otettiin toisesta keskuksista häiriöiden minimoimiseksi. Mittarin pihtikärjet kiinnitettiin vaihekiskojen syöttöihin ja hauenleukaliittimet vaihekiskoihin suoraan. Kuvasta 17 ilmenee mittarin kytkentä ja kuvasta 18 todellinen toteutus jakokaapissa.



Kuva 17. Fluken 434 -energia-analysointilaitteen kytkentä jännitekiskoihin. [26.]



Kuva 18. Fluke -energia-analysoija kytkettynä 63 A:n keskukseen mittausta varten.

Electric RaceAboutin lataaminen kytkettiin 3x16 A voimavirtapistorasiaan. Kuvassa 19 E-RA:n latausjohto on kiinnitetty autoon lataustavan 3 mukaisesti Mennekesin sähköautoille tarkoitetulla pistokkeella.



Kuva 19. Electric RaceAbout kytkettynä lataukseen.

Fiat Dobloja ladattiin kuvassa 20 näkyvän CHAdeMO-standardin pikalatauksella (lataustapa 4), joka kytkettiin sähkökeskukseen 3x32 A:n voimavirtapistorasiaan, ja kuvassa 21 näkyvällä langattomalla lataustavalla.



Kuva 20. Fiat Doblo kytkettynä CHAdeMO-pikalataukseen.



Kuva 21. Fiat Doblo ajettuna langattoman latauksen telakkaan.

6.3 Mittaustulokset

Ennen varsinaisia mittauksia tarkistettiin sähköverkon arvot mittauskeskuksesta tehoanalysointilaitteella. Taulukoista 3-5 nähdään kiinteistön sähköverkon arvojen olevan SFS-standardin EN-50160 asettamien rajojen sisällä. [9.]

Mittaus suoritettiin 10 sekunnin ajan ja näytteenotto oli 0,5 sekunnin välein. Verkon jännite pysyi tarkistuksen aikana vakaana ja taulukkoon 3 on laskettu vaiheiden L1, L2 ja L3 keskiarvo mittauksen aikana.

Taulukko 3. Vaihejännitteet keskuksessa.

L1 [V]	L2 [V]	L3 [V]
235	237	236

Taulukossa 4 on laskettu vaihejännitteen särön keskiarvo mittauksen aikana.

Taulukko 4. Jännitteen THD arvo.

THD V L1 [%]	THD V L2 [%]	THD V L3 [%]
1,0	0,9	0,8

Loistehon määrä keskuksen mittauspisteessä näkyy taulukossa 5.

Taulukko 5. Loistehon määrä keskuksessa.

L1 [var]	L2 [var]	L3 [var]	Kokonais [var]
120	267	160	533

Varsinaiset mittaukset toteutettiin suorittamalla kolme erillistä yhden minuutin mittausjaksoa jokaiselle sähköautolle, jonka jälkeen tehtiin yhteismittaus kaikille sähköautoille. Mittari oli asetettu mittaamaan 10 sekunnin keskiarvoja.

6.3.1 Electric RaceAbout

Electric RaceAboutin latauksen käyntivirtojen keskiarvot ovat laskettuna taulukkoon 6.

Taulukko 6. E-RA:n latauksen ottama virta.

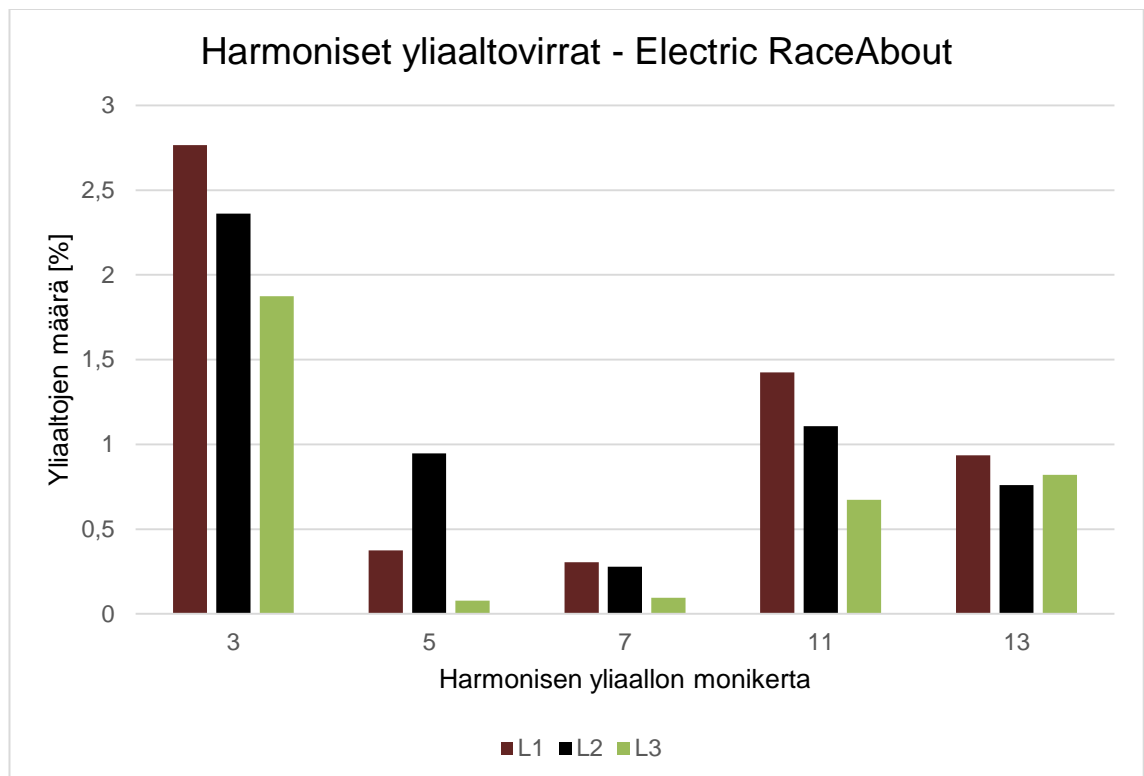
L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	N [A]
14,5	14,3	13,5	1,35

Latauksen aikana keskukselta mitattu keskimääräinen loistehon vaihekohtainen ja kokonaismäärä on taulukossa 7.

Taulukko 7. Loistehon määrä E-RA:n latauksessa.

L1 [var]	L2 [var]	L3 [var]	Kokonais [var]
293	413	373	1080

Kuvasta 22 näkee mittauksen aikaiset harmoniset yliaallot olennaisten monikertojen osalta.



Kuva 22. Electric RaceAboutin latauksen harmonisten yliaaltovirtojen määrä.

6.3.2 Fiat Doblon CHAdeMO-pikalataus

CHAdeMO-pikalatauksen käyntivirtojen keskiarvot ovat laskettuna taulukkoon 8.

Taulukko 8. CHAdeMO-pikalatauksen ottama virta.

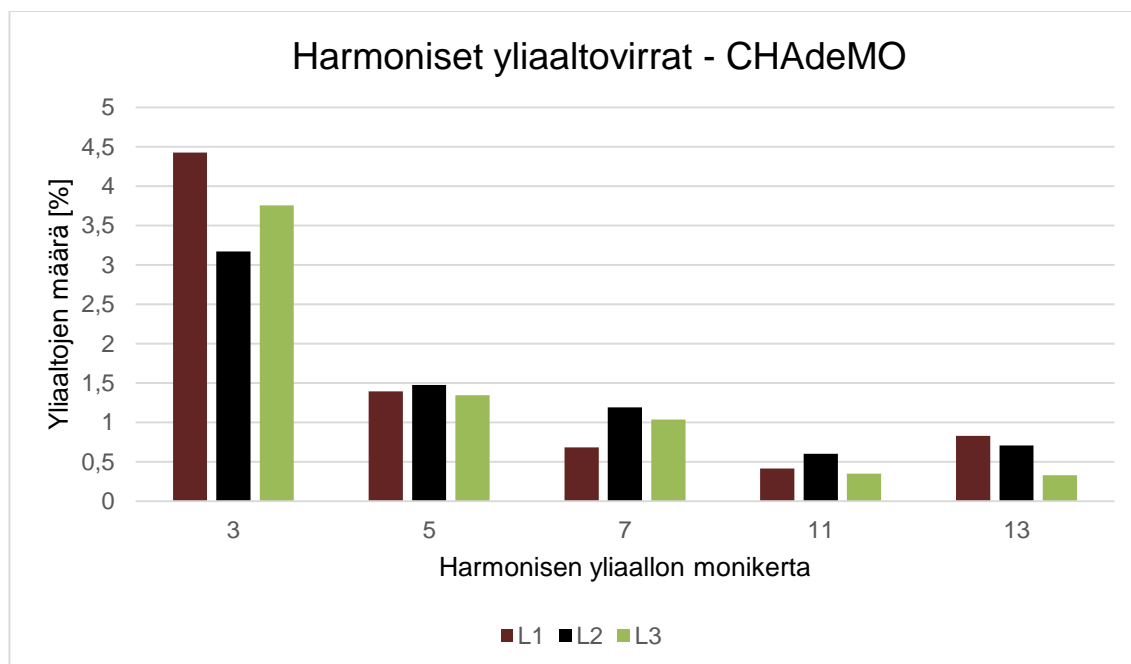
L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	N [A]
8,6	8,5	8,1	1,3

Latauksen aikana keskukselta mitattu keskimääräinen loistehon vaihekohtainen ja kokonaismäärä on taulukossa 9.

Taulukko 9. Loistehon määrä CHAdeMO:n latauksessa.

L1 [var]	L2 [var]	L3 [var]	Kokonais [var]
147	240	213	600

Kuvasta 23 näkee mittauksen aikaiset harmoniset yliaallot olennaisten monikertojen osalta.



Kuva 23. Fiat Doblon CHAdeMO-pikalatauksen harmonisien yliaaltovirtojen määrä.

6.3.3 Fiat Doblon langaton lataus

Langattoman latauksen käyntivirtojen keskiarvot ovat laskettuna taulukkoon 10.

Taulukko 10. Langattoman latauksen ottama virta.

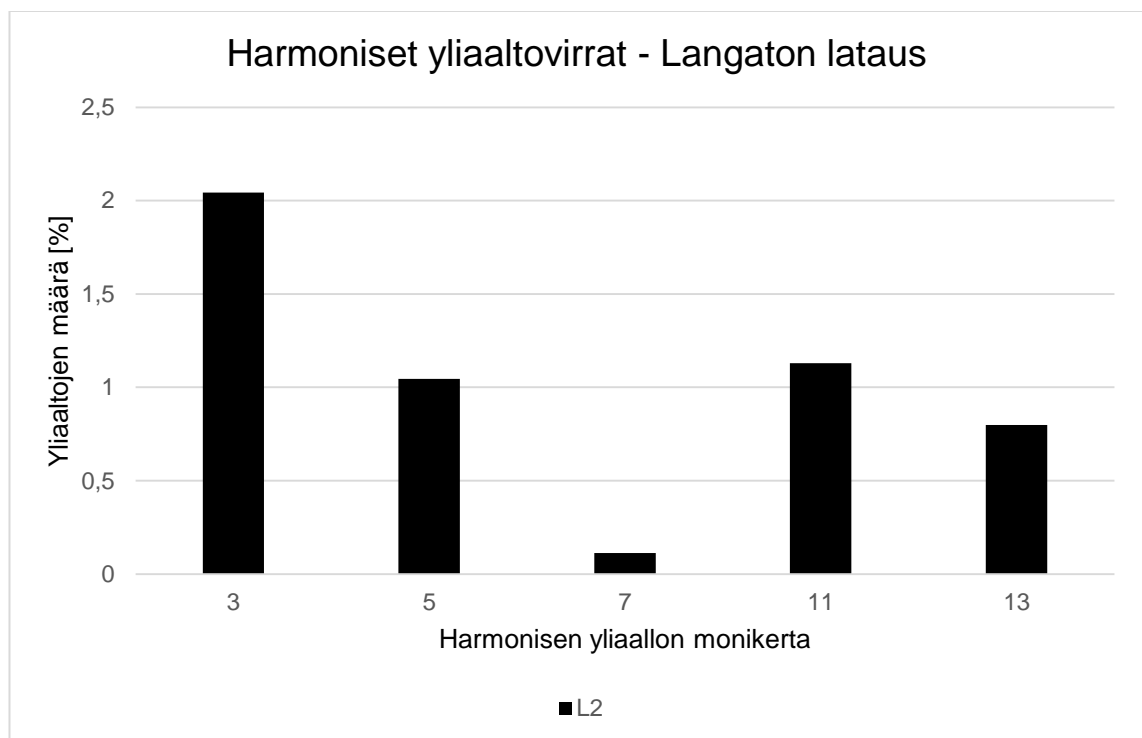
L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	N [A]
0,3	13,8	0,5	14

Latauksen aikana keskukselta mitattu keskimääräinen loistehon vaihekohtainen ja kokonaismäärä on taulukossa 11.

Taulukko 11. Loistehon määrä langattomassa latauksessa.

L1 [var]	L2 [var]	L3 [var]	Kokonais [var]
67	427	133	613

Kuvasta 24 näkee mittauksen aikaiset harmoniset yliaallot olennaisten monikertojen osalta.



Kuva 24. Fiat Doblon langattoman latauksen harmonisten yliaaltovirtojen määrä.

6.3.4 Yhteismittaus

Yhtäaikaisen latauksen käyntivirtojen keskiarvot ovat laskettu taulukkoon 12.

Taulukko 12. Kaikkien latauksien ottama virta.

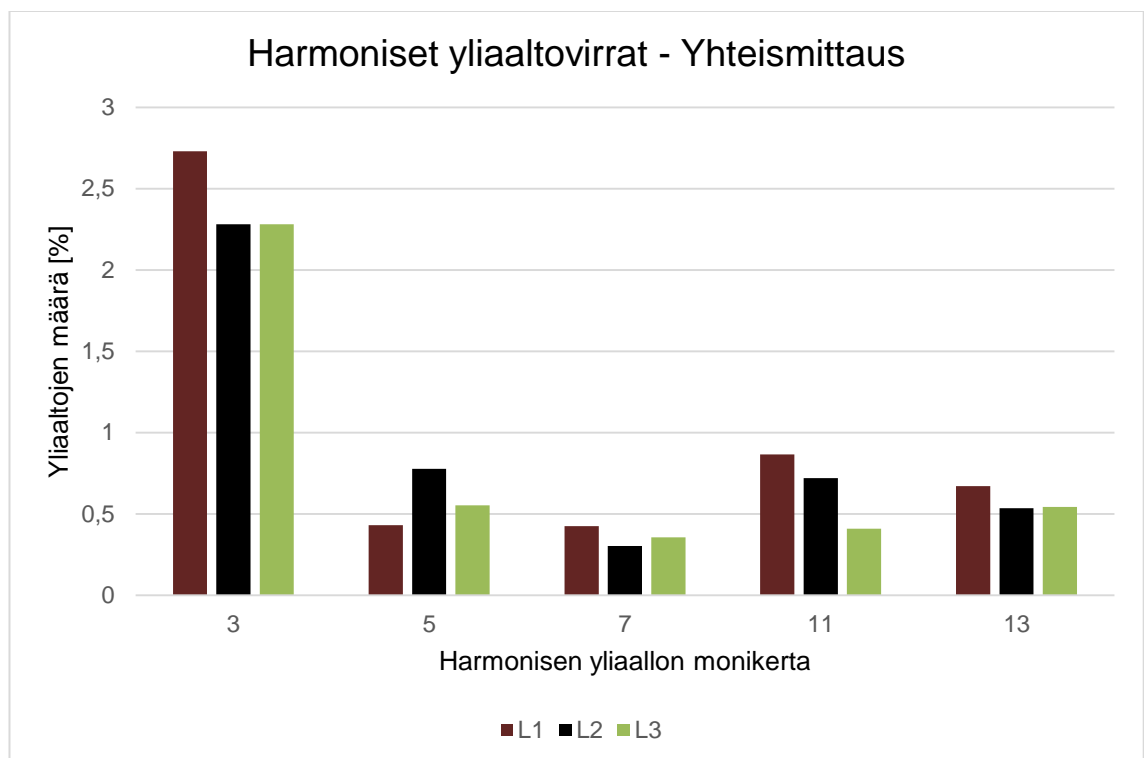
L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	N [A]
23,2	36,5	21,6	13,9

Latauksen aikana keskukselta mitattu keskimääräinen loistehon vaihekohtainen ja kokonaismäärä on taulukossa 13.

Taulukko 13. Loistehon määrä kun kaikki lataa.

L1 [var]	L2 [var]	L3 [var]	Kokonais [var]
347	693	480	1520

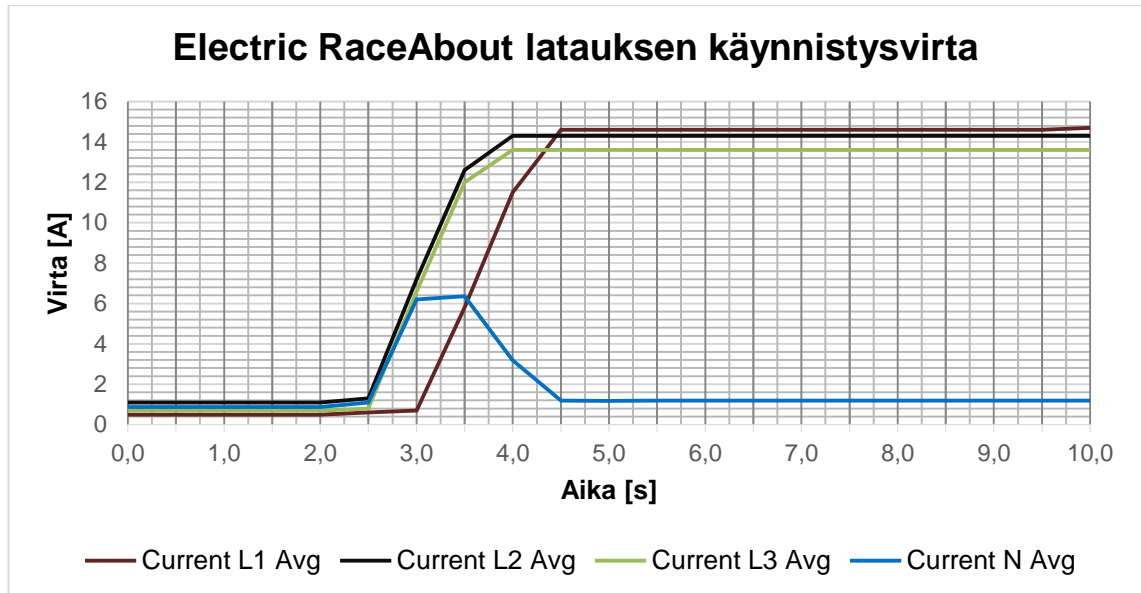
Kuvasta 25 näkee mittauksen aikaiset harmoniset yliaallot olennaisten monikertojen osalta.



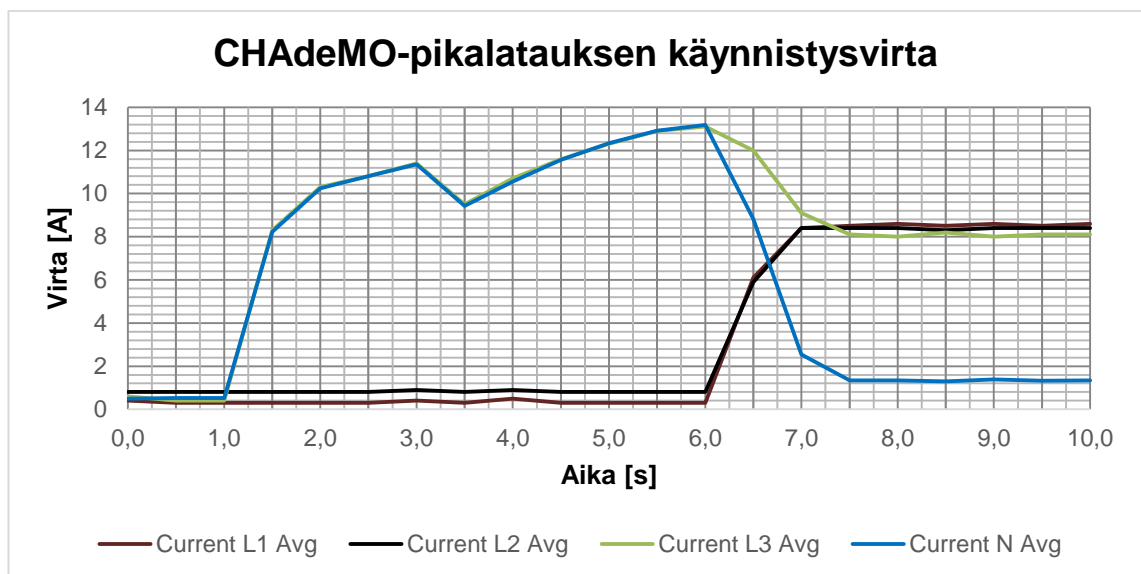
Kuva 25. Kaikkien sähköautojen latauksien harmonisten yliaaltovirtojen määrä.

6.3.5 Electric RaceAbout ja CHAdeMO-pikalatauksien käynnistyminen

Lopuksi suoritettiin Electric RaceAboutin ja CHAdeMO-pikalatauksien käynnistysvirtojen mittaus. Kuvista 26 ja 27 ilmenee latauksen käynnistyminen ja virran ottaminen 0,5 sekunnin tarkkuudella.



Kuva 26. Electric RaceAbout latauksen käynnistysvirta.



Kuva 27. CHAdeMO pikalatauksen käynnistysvirta.

Kuvista nähdään kuinka latausjärjestelmät nostavat tehon ensiksi yhdellä vaiheella ja kuormittavat silloin myös nolajohdinta. Varsinaisen latauksen alkaessa nolajohdinten kuormitus laskee. Nolla johtimelle jäävä noin 2 A:n kuormitus johtuu kolmannesta yliaallosta.

7 Parkkihallisimulointi

Mittaustuloksien perusteella voidaan laskea sähköajoneuvojen latauspisteillä varustetun parkkihallin sähkön laatua latauspisteiden ollessa käytössä. Simuloinnissa käytetään Caruna-verkkoyhtiön rakenteilla olevan uuden pääkonttorin kiinteistömuuntajan ja sitä syöttävän sähköverkon arvoja. Pääkonttorin parkkihalliin on suunnitteilla noin 150 parkkipaikkaa, joista 50 voidaan kuvitteellisesti sanoa olevan sähköautojen latauspisteillä varustettuja.

Simulaation laskelmissa on käytetty Carunan käytössä olevan verkkotietojärjestelmä Trimble NIS:n tietokannasta löytyviä arvoja sähköasemalla ja kiinteistömuuntajalla. Näiden arvojen avulla voidaan laskea harmonisten yliaaltojen määrä parkkihallissa.

Sähköverkon arvot

Muuntajan arvot

$$S = 40 \text{ MVA}$$

$$\frac{U_{T1}}{U_{T2}} = \frac{20}{0,4} \text{ kV}$$

$$U_Q = 21 \text{ kVA}$$

$$S_{nT} = 1000 \text{ kVA}$$

$$u_k = 0,06$$

Sähköverkon ja muuntajan reaktanssit on laskettu alla ja summattu yhteen.

$$X_Q = \left(\frac{U_{T2}}{U_{T1}}\right)^2 * \frac{U_Q^2}{S} = \left(\frac{0,4}{20}\right)^2 * \frac{(21 \text{ kV})^2}{40 \text{ MVA}} = 4,41 \text{ m}\Omega$$

$$X_R = u_k * \frac{U_{T2}^2}{S_{nT}} = 0,06 * \frac{(0,4 \text{ kV})^2}{1000 \text{ kVA}} = 9,6 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Q1} = X_Q + X_T = 4,41 \text{ m}\Omega + 9,6 \text{ m}\Omega = 14,01 \text{ m}\Omega$$

Laskettujen reaktanssien avulla voidaan laskea harmonisten yliaaltojen reaktanssit.

$$X_{Qi} = iX_{Q1}, \quad (1)$$

$$X_{TQ3} = 3 * 14,01 \text{ m}\Omega = 42,03 \text{ m}\Omega$$

$$X_{TQ5} = 5 * 14,01 \text{ m}\Omega = 70,05 \text{ m}\Omega$$

$$X_{TQ7} = 7 * 14,01 \text{ m}\Omega = 98,07 \text{ m}\Omega$$

Harmonisten yliaaltojen virrat saadaan laskemalla mitattujen virtojen ja harmonisen yliaaltoprosentin avulla. Simulaatiossa laskettuna oletetaan kaikkien vaiheiden kuormitus yhtä suuriksi.

$$I_i = xI, \quad (2)$$

missä

x = mitattu harmonisten yliaaltojen määrä

I = latauksessa mitattu virta

E-RA

$$I_{E3} = 0,023 * 14,1 \text{ A} = 0,324 \text{ A}$$

$$I_{E5} = 0,005 * 14,1 \text{ A} = 0,071 \text{ A}$$

$$I_{E7} = 0,02 * 14,1 \text{ A} = 0,28 \text{ A}$$

Doblo CHAdeMO

$$I_{F3} = 0,038 * 8,4 \text{ A} = 0,319 \text{ A}$$

$$I_{F5} = 0,014 * 8,4 \text{ A} = 0,118 \text{ A}$$

$$I_{F7} = 0,01 * 8,4 \text{ A} = 0,084 \text{ A}$$

Doblo langaton lataus

$$I_{W3} = 0,02 * 13,74 \text{ A} = 0,275 \text{ A}$$

$$I_{W5} = 0,01 * 13,74 \text{ A} = 0,137 \text{ A}$$

$$I_{W7} = 0,001 * 13,74 \text{ A} = 0,014 \text{ A}$$

Kaikki yhdessä

$$I_{A3} = I_{E3} + I_{F3} + I_{W3} = 0,324 \text{ A} + 0,319 \text{ A} + 0,275 \text{ A} = 0,918 \text{ A}$$

$$I_{A5} = I_{E5} + I_{F5} + I_{W5} = 0,071 \text{ A} + 0,118 \text{ A} + 0,137 \text{ A} = 0,326 \text{ A}$$

$$I_{A3} = I_{E3} + I_{F3} + I_{W3} = 0,028 \text{ A} + 0,084 \text{ A} + 0,014 \text{ A} = 0,126 \text{ A}$$

Laskettujen arvojen avulla saadaan jännitteen U_i arvo kaavalla (3).

$$U_i = X_{Qi} I_i, \quad (3)$$

E-RA

$$U_{E3} = 42,03 \text{ m}\Omega * 0,324 \text{ A} = 13,62 \text{ mV}$$

$$U_{E5} = 70,05 \text{ m}\Omega * 0,071 \text{ A} = 4,97 \text{ mV}$$

$$U_{E7} = 98,07 \text{ m}\Omega * 0,028 \text{ A} = 2,75 \text{ mV}$$

Doblo CHAdeMO

$$U_{F3} = 42,03 \text{ m}\Omega * 0,319 \text{ A} = 13,41 \text{ mV}$$

$$U_{F5} = 70,05 \text{ m}\Omega * 0,118 \text{ A} = 8,27 \text{ mV}$$

$$U_{F7} = 98,07 \text{ m}\Omega * 0,084 \text{ A} = 8,24 \text{ mV}$$

Doblo Langaton lataus

$$U_{W3} = 42,03 \text{ m}\Omega * 0,275 \text{ A} = 11,56 \text{ mV}$$

$$U_{W5} = 70,05 \text{ m}\Omega * 0,137 \text{ A} = 9,60 \text{ mV}$$

$$U_{W7} = 98,07 \text{ m}\Omega * 0,014 \text{ A} = 1,37 \text{ mV}$$

Kaikki yhdessä

$$U_{W3} = 42,03 \text{ m}\Omega * 0,918 \text{ A} = 38,58 \text{ mV}$$

$$U_{W5} = 70,05 \text{ m}\Omega * 0,326 \text{ A} = 22,84 \text{ mV}$$

$$U_{W7} = 98,07 \text{ m}\Omega * 0,126 \text{ A} = 12,36 \text{ mV}$$

Jännitesärö THD voidaan laskea kaavalla (4).

$$U_{THD} = \sqrt{\left(\frac{\sum U_i^2}{U_1}\right)} * 100 \%, \quad (4)$$

E-RA

$$U_{THD} = \sqrt{\left(\frac{(13,62^2 + 4,97^2 + 2,75^2) mV}{230 V}\right)} * 100 \% = 0,97 \%$$

Doblo CHAdeMO

$$U_{THD} = \sqrt{\left(\frac{(13,41^2 + 8,27^2 + 8,24^2) mV}{230 V}\right)} * 100 \% = 0,12 \%$$

Doblo Langaton lataus

$$U_{THD} = \sqrt{\left(\frac{(11,56^2 + 9,60^2 + 1,37^2) mV}{230 V}\right)} * 100 \% = 0,10 \%$$

Kaikki yhdessä

$$U_{THD} = \sqrt{\left(\frac{(38,58^2 + 22,84^2 + 12,36^2) mV}{230 V}\right)} * 100 \% = 0,31 \%$$

Edellä laskettuja jännitesäröjä summaamalla voidaan laskea useamman sähköauton aiheuttama THD-arvo. Mikäli sähköautoja on latauksessa yhtäaikaisesti 60 kpl, saadaan harmonisten yliaaltojen määräksi 3,68 %, kun latauksessa on jokaista eri autoa 20 kpl ja kuormitus jakautuu tasaisesti jokaiselle vaiheelle. Jos kaikki autot on varustettu samoilla latausjärjestelmillä, saadaan E-RA:lle harmonisten yliaaltojen määräksi 5,84 %, CHAdeMO:lle 7,03 % ja Doblun langattomalle lataukselle 5,97 % kaikkien kuormittaessa samaa vaihetta ja 1,99 %, jos kuormitus on jaettu tasaisesti kaikille kolmelle vaiheelle. [1; 11.]

8 Yhteenveto

Sähköautojen yleistyessä niiden erilaiset latausratkaisut voivat aiheuttaa sähköjakeluverkkoon sähkön laatuun vaikuttavia häiriöitä. Yksittäinen pieni häiriö voi aiheuttaa ongelmia, niiden vaikutukset kasautuvat ja aiheuttavat enemmän häiriöitä, kun nämä lisääntyvät. Tässä työssä tarkkailun alla oli latausjärjestelmien aiheuttamat harmoniset yliaallot ja verkkoon muodostunut loisteho. Näiden aiheuttamat sähkön laadulliset ongelmat voidaan helposti kompensoida ja suodattaa pois verkosta häiriöiden estämiseksi.

Harmonisien yliaallojen suodattaminen on kannattavaa häiriövaikutuksien välttämiseksi. Useat sähköautojen hitaat lataukset ovat 1-vaihelatauksia, jolloin niistä aiheutuvat kolmannet yliaallot tulisi suodattaa. Samalla tulisi tarkistaa myös loistehon kompensoinnin tarve. Käytettäessä 1-vaiheisia latausjärjestelmiä tulee huomioida kuormituksen mahdollinen epäsymmetria ja suunnitella kompensointi sen mukaisesti.

Sähköautoissa on monia erilaisia latausjärjestelmiä, joista tässä insinööriyössä tarkasteltiin kolmea. Kaikissa projektin autoissa on käytetty laadukkaita latausjärjestelmiä ja niiden optimointi on tehty energiatehokkaasti. Mittauksissa näkyy latausjärjestelmien laatu hyvälaatuisena latausvirtana.

Mittauksien perusteella laskettiin Caruna-verkkoyhtiön uuden pääkonttorin parkkihalliin kuvitteelliset sähköautojen latauspisteet, ja käytettiin syöttävänä sähköverkon arvoina Vermon sähköaseman ja pääkonttorin kiinteistömuuntamon sähköisiä arvoja. Projektin autojen latausjärjestelmien hyvän laadun takia useampi samanaikainen lataus ei aiheuta suuria ongelmia ja näiden kompensointi on helppo toteuttaa.

Uusia kohteita rakentaessa tulee ottaa huomioon sähköauton latausjärjestelmien tyyppi ja niiden kompensoinnin tarve. Tärkeitä asioita on pikalatauksien määrä ja hitaiden 1-vaihelatauksien kuormituksen suunnittelu. Sarjatuotantosähköautojen latausjärjestelmät noudattavat niille määrättyjä standardeja ja aiheuttavat vain pieniä määriä sähkön laadullisia häiriöitä sähköverkkoon. Näiden kompensoinnin tarve on helposti ennakoitavissa ja toteutettavissa.

Lähteet

- 1 Pöllänen, Minna. 2011. Sähkön laatu sähköautoa ladattaessa. Insinööriyö; luetu: 13.3.2013
- 2 Sk 69 Sähköautot ja latausjärjestelmät. Verkkodokumentti. Sesko ry. http://www.sesko.fi/portal/fi/standardointikomiteat/komitealista_ja_komiteasivut/sk_69__sahkoautot_/; luettu: 16.4.2015
- 3 Sähköautojen standardointi. 2014. Verkkodokumentti. Sähköautot – Nyt! hanke. <http://www.sahkoautot.fi/wiki:saehkoeautojen-standardointi>; luettu: 9.4.2015
- 4 Korpinen, Leena; Mikkola, Marko; Keikko, Tommi; Falck, Emil. Luentomateriaali. Yliaalto-opus; luettu: 16.2.2015
- 5 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Sähköinfo Oy; luettu: 16.2.2015
- 6 Harmonic Distortion. 2010. Verkkodokumentti. Electrical Engineering Portal. <http://electrical-engineering-portal.com/harmonic-distortion>; luettu: 20.4.2015
- 7 Rectifier. Verkkodokumentti. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>. Päivitetty 20.4.2015; luettu: 20.4.2015
- 8 Sähkötieto ry. 2014. ST-kortti 52.16: Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 100 V:n pienjänniteverkossa. Sähköinfo Oy; luettu: 10.3.2015
- 9 Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2008. SFS-standardi. EN-50160. Suomen standardoimisliitto SFS ry. ; luettu: 16.2.2015
- 10 ABB Oy. 2012. Tuote-esite. Yliaaltosuodatin pienjänniteverkkoon. ABB Oy; luetu: 16.2.2015
- 11 ABB Oy. 2000. Teknisiä Tietoja ja Taulukoita –käsikirja. ABB Oy; luettu: 10.3.2015

- 12 ABB Oy. 2011. Tuote-esitys. Kompensointiparitit. ABB Oy; luettu: 16.2.2015
- 13 Sähkötieto ry. 2014. ST-kortti 52.15: Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. Sähköinfo Oy; luettu: 10.3.2015
- 14 SESKO ry. 2012. Sähköautojen lataaminen kiinteistöjen sähköverkoissa. SESKO ry; luettu: 19.2.2015
- 15 International Electrotechnical Commission. 2010. Standardi. EN 61851-1. International Electrotechnical Commission; luettu: 19.2.2015
- 16 Sähköajoneuvojen liittimet. Verkkodokumentti. Phoenix Contact Oy. https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?1dmy&urile=wcm%3apath%3a/fifi/web/main/products/subcategory_pages/E-mobility_plug-in_connectors_P-20-12/df8e2122-37ca-4529-8a17-ed17e8eba258; luettu: 20.4.2015
- 17 Kurvinen, Annika. 2013. Pro gradu. Sähköisen liikenteen kysyntäjoustopalveluiden tuottaminen ja hajautetut energiantuotannon tasapainottaminen; luettu: 19.2.2015
- 18 Uudet latausasemat lyhentävät sähköauton latausajan alle 20 minuuttiin. Verkkodokumentti. 2012. Automerkit.fi. http://www.automerkit.fi/autouutiset/autouutiset/6354-uedet-latausasemat-lyhentavat-sahkoauton-latausajan-alle-20-minuuttiin#!Fortum_sahkoautonlataus_1; luettu: 16.2.2015
- 19 Suomen julkiset latauspisteet. Verkkodokumentti. 2015. Sähköinenliikenne.fi. <http://www.sahkoinenliikenne.fi/suomen-julkiset-latauspisteet>; luettu: 16.2.2015
- 20 Alakangas, Eija. 2000. Julkaisu. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus; luettu: 10.3.2015
- 21 Alahäivälä, Antti. 2012. Diplomityö. Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin; luettu: 9.4.2015

- 22 den Bossche, P. V., Vergels, F., Mierlo, J. V., Matheys, J. ja Autenboer, W. V., 2006. Julkaisu. An assessment of sustainable battery technology. Journal of Power; luettu: 10.4.2014
- 23 Young K., Wang C., Wang L. Y., Strunz K., 2013. Julkaisu. Electric Vehicle Battery Technologies Chapter 2; luettu: 11.3.2015
- 24 Sainio Joonas. 2013. Insinööriyö. Akunhallintajärjestelmän suunnittelu ja toteutus Electric RaceAbout sähköurheiluautoon; luettu: 4.3.2015
- 25 Eskelinen Ville. 2014. Raportti. Inductive charging field experiment; luettu: 15.4.2015
- 26 Fluke 343/345 Three Phase Power Quality Analyzer. Käyttöohje; luettu: 4.2.2015