



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SÄHKÖAUTOJEN LATAUSPISTEET ULKOVALAISTUSVERKOSSA

Henri Hirvonen

Opinnäytetyö
Elokuu 2017
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

HIRVONEN HENRI:

Sähköautojen latauspisteet ulkovalaistusverkossa

Opinnäytetyö 71 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Elokuu 2017

Tämä opinnäytetyö liittyy Tampereen kaupungin ja muiden yhteistyökumppaneiden tekemään tutkimukseen ulkovalaistusverkon hyödyntämisestä sähköautojen latauspisteiden yhteydessä. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin ulkovalaistusverkon soveltuvuutta haluttuun käyttötarkoitukseen ja rakennettiin tällaiseen verkkoon liitettävän latauspisteen prototyyppi.

Latauspisteen prototyyppi sisältää kaikki tarvittavat ohjaus- ja suojalaitteet turvallista sähköauton lataamista varten. Opinnäytetyössä tarkasteltiin lisäksi sähköautojen sisäisiä tehonsiirtojärjestelmiä liittyen akkujen lataamiseen, ulkovalaistusverkon rakennetta ja sen aiheuttamia ongelmia latauspisteisiin liittyen sekä latauspisteen prototyyppiin liittyviä eri komponentteja.

Latauspisteen prototyypin rakentaminen haluttiin pitää yksinkertaisena, joten siihen ei sisällytetty etäohjausta tai käyttäjän tunnistamista vielä tässä vaiheessa. Etäohjaus on kuitenkin mahdollista toteuttaa myöhemmässä vaiheessa. Projektin aikana ilmeni joitakin ongelmia liittyen valaistusverkon rakenteeseen sekä tiettyjen komponenttien puutteelliseen dokumentaatioon. Näihin ongelmiin löydettiin kuitenkin ratkaisut, jolloin niiden huomioiminen onnistuu tulevaisuudessa.

Tehty latauspisteen prototyyppi saatiin onnistuneesti rakennettua ja liitettyä osaksi ulkovalaistusverkkoa. Prototyypin toiminnallisuus saatiin myös testattua ja sen todettiin täyttävän sille asetetut vaatimukset. Latauspisteiden liittäminen ulkovalaistusverkon osaksi onnistuu, kun tietyt opinnäytetyön yhteydessä havaitut ongelmakohdat huomioidaan rakennusvaiheessa.

Asiasanat: sähköajoneuvot, latauspiste, prototyyppi, ulkovalaistusverkko

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

HIRVONEN HENRI:

Electric Vehicle Charging Stations in Outdoor Lighting Grids

Bachelor's thesis 71 pages, appendices 2 pages
August 2017

This thesis is a part of a study conducted by the city of Tampere and other affiliates in which the feasibility of electric vehicle charging stations placed in outdoor lighting grids is examined. The purpose of the thesis was to build a prototype model of such charging station and study how suitable the outdoor lighting grid would be for such a use.

The prototype of the charging station includes all the necessary control and safety devices to allow for safe charging of an electric vehicle. The thesis also includes analysis of power electronics related to charging of electric vehicle batteries. The structure of outdoor lighting grids and the possible problems it causes to charging stations are also examined. The electrical components used in the charging station are also examined in detail in this thesis.

The charging station prototype was kept quite simple, so it doesn't feature any remote access or user identification at this point. Remote access to the charging controller can be implemented in the future. During the project, some problems related to the structure of the outdoor lighting grid and lacking documentation of certain electrical components arose. Solutions to these problems were found so they can be considered in the future.

A working prototype of an electric vehicle charging station was built and connected to an outdoor lighting grid. Testing the functionality of this prototype was also carried out and it was deemed to satisfy all the requirements placed on it. Using a charging station like the one constructed in outdoor lighting grids is possible if certain shortcomings of the outdoor lighting grids are considered during construction.

Key words: electric vehicles, charging stations, prototype, outdoor lighting

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖAUTOJEN NYKYTILANNE	8
3	SÄHKÖAUTOJEN LATAUSJÄRJESTELMÄT	10
3.1	Sähköautojen lataustavat.....	10
3.2	Latauspistokytkimet.....	12
3.3	Sähköauton sisäinen tehonsiirtojärjestelmä	15
3.3.1	Tasasuuntaajat	16
3.3.2	Tyristorit ja ohjatut tasasuuntaussillat.....	19
3.3.3	Hakkuriteholähteet	21
3.4	Suuntaajien verkkovaikutukset ja yliaallot	22
3.5	Akkujen lataaminen ja olosuhteiden vaikutus	28
3.6	Älykäs verkko ja Vehicle-to-grid (V2G).....	30
4	LATAUSPISTEEN SUUNNITTELU	33
4.1	Lataussäädin.....	33
4.2	Ohjaussignaalit.....	36
4.3	Latauspisteen muut komponentit	40
4.4	Latauspisteen kytkentäkaavion suunnittelu	41
5	LATAUSPISTEIDEN SIJOITTAMINEN VALAISTUSVERKKOON	44
5.1	KeyLight-verkkotietojärjestelmä	44
5.2	Valaistusverkon rakenne ja soveltuvuus sähköautojen lataukseen.....	45
5.3	Valaistuksen ohjaus	50
5.4	Kuormituslaskelmat ja latauspisteiden sijoitus.....	51
6	LATAUSPROTOTYYPIN RAKENTAMINEN	57
6.1	Rakennusvaihe	57
6.2	Käyttöönottotarkastus	60
6.3	Latauspisteen toiminnan testaus	63
7	YHTEENVETO JA LATAUSPISTEEN JATKOKEHITTÄMINEN	65
	LÄHTEET.....	67
	LIITTEET	70
	Liite 1. Piirikaavio	70
	Liite 2. Valaistuskeskus (Tampereen kaupunki 2017)	71

ERITYISSANASTO

Hybridiajoneuvo	Ajoneuvo, joka hyödyntää käyttövoimanaan sähköenergiaa ja polttomoottoria
Lataushybridi	Hybridiajoneuvo, jonka akusto on ladattavissa
Latauspiste	Piste, jossa sähköajoneuvo on liitetty kiinteään asennukseen
Lataustapa 1	Kevyiden sähköajoneuvojen lataus kotitalouspistorasioiden kautta, latausvirta suurimmillaan 16 A
Lataustapa 2	Hidas lataus, latausvirta suurimmillaan 32 A, latauskaapeli sisältää ohjaus- ja suojaominnot ja se liitetään kotitalouspistorasiaan
Lataustapa 3	Peruslataus, latauspiste on asennettu kiinteästi ja se sisältää ohjaus- ja suojaominnot
Lataustapa 4	Teholataus, käytössä auton ulkopuolinen akkulaturi
Smart grid	Älykäs sähköverkko
Täyssähköauto	Ajoneuvo, joka saa käyttövoimansa kokonaan sähköenergiasta
V2G	Vehicle-to-grid, kaksisuuntainen tehonsiirto sähköajoneuvojen ja sähköverkon välillä

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan sähköauton latauspisteiden toimivuutta ulkovalaistusverkon yhteydessä. Tampereen kaupungin tavoitteena on päästä sähköisen liikenteen edelläkävijäksi vuoteen 2025 mennessä ja taustalla siinä ovat liikenteen päästöjen vähentäminen, älyliikenteen ratkaisujen ja palvelujen kehittäminen sekä viihtyisämmän kaupunkiympäristön luominen. Sähköisen liikenteen toteutussuunnitelmaan liittyy sähköbussihankkeen lisäksi uusien innovaatioiden etsiminen sähköiseen liikkumiseen liittyen. Sähköautojen valopylväslatauskokeilussa tutkitaan nykyisen ulkovalaistusverkon mahdollista hyödyntämistä sähköautojen lataamisessa ja se on osa E-Mobility Works -projektia. (Tampereen kaupunki 2016a)

Jo olemassa olevan sähköverkon hyödyntämisessä on monia hyviä puolia, uusia investointeja sähköverkon rakentamiseen ei tarvitse tehdä ja etenkin keskusta-alueilla vältytään hankalilta maakaapelointitöiltä. Täysin ongelmatonta sähköauton latauspisteen suunnittelu ulkovalaistusverkon yhteyteen ei kuitenkaan ole ja näitä ongelmakohtia käsitellään työn yhteydessä tarkemmin.

Työssä tarkastellaan sähköautojen nykytilannetta Suomessa ja yleisten sähköautojen latauspisteiden määrää Tampereen alueella. Lisäksi työssä käydään läpi sähköautojen sisäisiä tehonsiirtojärjestelmiä, mutta painopiste on kuitenkin akkujen lataamiseen liittyvissä komponenteissa ja niiden verkostovaikutuksissa. Suurin osa työstä käsittelee kuitenkin latauspisteen prototyypin suunnittelua ja sen rakentamista sekä valmiiseen latauspisteeseen liittyviä tarkastuksia ja testausta. Työssä käydään läpi latauspisteen eri komponentit ja niiden toiminta osana latauspistettä.

Koska latauspiste tulee ulkovalaistusverkon yhteyteen, on sen rakennetta myös tarkasteltava. Samalla pohditaan nykymuotoisen ulkovalaistusverkon sopivuutta tähän käyttötarkoitukseen ja kuinka esiintyvät ongelmat voitaisiin ratkaista. Lopuksi tarkastellaan prototyypin mahdollisia jatkokehitysvaiheita ja muita ominaisuuksia, joita ei nyt rakennetun prototyypin yhteydessä vielä otettu käyttöön.

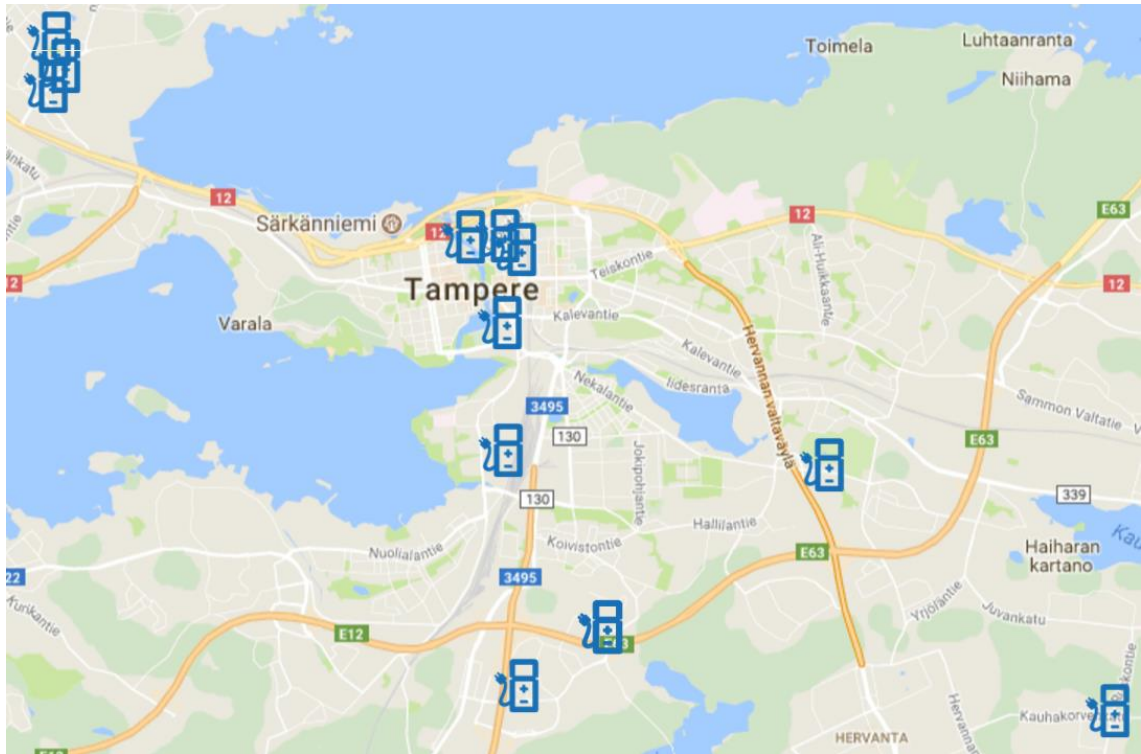
Projektin toteutuksessa mukana ovat olleet Tampereen kaupunki, Tampereen Sähkölaitos, Ramboll Finland Oy, IGL-Technologies Oy, Tampereen ammattikorkeakoulu ja Tampereen aikuiskoulutuskeskus.

2 SÄHKÖAUTOJEN NYKYTILANNE

Sähköautot voidaan jakaa eri luokkiin, täyssähköautoihin ja lataushybrideihin. Sähköautot saavat käyttövoimansa puhtaasti verkosta ladattavalla sähköllä ja Suomessa yleisimpien sähköautojen akkukapasiteetti on tyypillisesti väliltä 24 kWh (Nissan Leaf) - 100 kWh (Tesla Model S) (Nissan 2017; Tesla 2017). Lataushybridit hyödyntävät voimansiirrossa sekä poltto- että sähkömoottoreita. Lataushybridit voivat olla rakenteeltaan rinnakkaishybridejä tai sarjahybridejä. Rinnakkaishybrideissä poltto- ja sähkömoottori tuottavat rinnakkain mekaanista teho kuormalle ja sarjahybridissä vastaavasti polttomoottorin tuottama pyörimisenergia muunnetaan sähköenergiaksi, joka siirretään joko energiavarastoon tai suoraan sähkömoottorille. Lataushybridien akkukapasiteetti on täyssähköautoja pienempi, esimerkiksi Toyota Prius Plug-in – mallissa akkukapasiteetti on 8,8 kWh, mutta niillä voidaan silti ajaa huomattava osa ajokilometreistä verkosta ladattavalla sähköllä sopivissa olosuhteissa (Toyota 2017, 8). (Hietalahti 2011a, 22–24).

Sähköautojen ja ladattavien hybridien määrä on kasvussa Suomessa, joten latauspisteille on entistä enemmän kysyntää. Vuoden 2015 lopulla ladattavien hybridien ja sähköautojen määrä kokonaisuudessaan oli 1587 kappaletta. Tämä luku oli vuoden 2016 loppuun mennessä kasvanut jo 3285 autoon ja kesäkuun 2017 loppuun mennessä ladattavien sähköautojen ja hybridien määrä yhteensä oli 4824. Ladattavien hybridien määrä on kasvanut kuitenkin puhtaita sähköautoja nopeammin, viimeisimmästä yhteismäärästä sähköautoja oli vain noin neljäsosa eli 1142 kappaletta. Ladattavissa hybrideissä akkujen kapasiteetti on tyypillisesti sähköautoja pienempi, jolloin niiden lataamiseen voidaan käyttää pienempiä lataustehoja latausajan kasvamatta liian pitkäksi. (Trafi 2017a, 2017b).

Vaikka sähköautojen määrä on kiihtyvässä kasvussa, ei samaa kasvua ole havaittavissa julkisten latauspisteiden yleistymisessä. Tampereen alueella julkisia sähköautojen latauspisteitä on edelleen melko harvassa ja ne ovat keskittyneet lähinnä isojen kauppakeskusten ja pysäköintitalojen yhteyteen. Latausinfraan yleistymisen apuna voisivat olla erilaiset investointituet. Kuvassa 1 on esitettyä Tampereen alueella tällä hetkellä olevat julkiset latauspisteet.



KUVA 1. Tampereen alueella olevat julkiset latauspisteet (Sähköinen liikenne 2017)

Julkisten latauspisteiden määrä ja ominaisuudet vaihtelevat hieman eri palveluiden kesken, mutta nyt tarkastellun palvelun mukaan lataustavan 3 mukaisia latauspisteitä tyypin 2 pistokkeella on tällä hetkellä yhteensä 7 eri sijainnissa. Julkiseen käyttöön tarkoitettuja lataustavan 4 mukaisia DC-pikalatauspisteitä löytyy ainoastaan yhdestä sijainnista Tampereen alueelta. Loput latauspisteistä ovat normaaleilla kotitalouspistorasioilla varustettuja hitaampia latauspisteitä, jolloin latausvirta on rajoitettu suurimmillaan 16 ampeeriin. Tarkemmin lataustapoja on käsitelty luvussa 3.1. (Sähköinen liikenne 2017).

Tampereella tieliikenteen osuus päästöistä on nykyisellään noin 25 %. Tampereen kaupungin tavoitteena onkin vähentää CO₂-päästöjä 40 prosentilla vuoteen 2025 mennessä kaupungin ilmastostrategian mukaisesti. Liikenteen osalta päästöt kasvavat 14 prosentilla vuoteen 2030 mennessä ilman toimenpiteitä riippumatta ajoneuvotekniikan kehityksestä. Tavoitteena onkin liikenteen päästöjen vähentäminen vuoteen 2030 mennessä ja sähköautot ja niiden käyttöönotto ovatkin yksi osa toimenpiteistä tähän liittyen. Sähköautojen yleistymisen apuna voisi toimia esimerkiksi suora hankintatuki ja julkisten hankintojen painottuminen sähköautoihin. (Tampereen kaupunki 2010, 17, 19).

3 SÄHKÖAUTOJEN LATAUSJÄRJESTELMÄT

Tässä luvussa tarkastellaan sähköautojen erilaisia lataustapoja ja käydään läpi sähköautojen latauksessa käytettäviä pistokkeita. Näiden lisäksi tarkastelussa on sähköautojen akkujen lataamiseen liittyvä tehoelektroniikka, lataamisen aiheuttamat vaikutukset sähköverkkoon, olosuhteiden vaikutus akkujen lataamiseen ja sähköautojen rooli älykkään sähköverkon osana.

3.1 Sähköautojen lataustavat

Sähköautojen eri lataustavat ovat määriteltyinä standardissa SFS-EN 61851-1:2010 ja niitä on neljä erilaista. Lataustavassa 1 tai kevyiden sähköajoneuvojen latauksessa sähköajoneuvo kytketään yksivaiheisesti kuvassa 2 esitettyyn tavalliseen kotitalouspistorasiaan. Suurin sallittu latausvirta tällöin on 16 A ja jännite 250 V. Standardi SFS-EN 61851 sallii myös kolmivaiheisen lataamisen, jolloin suurin sallittu jännite on 480 V. Latauspistorasian on oltava suojattu kiinteään asennukseen kuuluvalla enintään 30 mA vikavirtasuojalla. Esimerkiksi Yhdysvalloissa lainsäädäntö kuitenkin estää lataustavan 1 mukaisen sähköajoneuvojen lataamisen. (Sesko 2016; SFS-EN 61851-1:2011, 14).



KUVA 2. Kotitalouspistorasia (Mennekes 2011)

Lataustavassa 2 eli hitaassa latauksessa sähköauto kytketään vastaavasti kuin lataustavassa 1, mutta käytetty latausvirta voi olla maksimissaan 32 A eivätkä jännitetasot saa olla lataustavassa 1 mainittuja suurempia. Autovalmistajan hyväksymässä latauskaapelissa on myös oltava ohjaus- ja suojalaiteyksikkö, jonka on sijaittava korkeintaan 0,3 metrin etäisyydellä sähköajoneuvon liittimestä. Lataustapa 2 soveltuu sähköautojen tilapäiseen lataukseen tai pitkäaikaiseen lataukseen, mikäli latauspistorasiasta otettava latausvirta on rajoitettu riittävän pieneksi (autot rajoittavat verkosta otettua virtaa tätä lataustapaa käytettäessä, yleensä raja on 8 A) ja saatavilla oleva latausteho täten on tyypillisesti alle 2 kW. Latausvirran rajoittamista suositellaan, sillä kotitalouspistorasioita ei testata jatkuvalla täydellä kuormitusvirralla vaan testaus tapahtuu hetkellisellä yhden tunnin kestäväällä 22 A ylivirralla. Tätä lataustapaa voidaan hyödyntää myös yleisesti löytyvien lämmityspaikkojen yhteydessä. (Sesko 2016; SFS-EN 61861-1:2011, 14; SFS-EN 60309-1:2000, 23)

Lataustavassa 3 eli peruslatauksessa sähköauton lataus tapahtuu latauspisteestä, jonka ohjaus- ja suojatoiminnot on sijoitettu kiinteästi sähköverkkoon. Tämä on myös lataustapa, joka valittiin ulkovalaistusverkon yhteyteen tulevaan sähköauton latauspisteprototyyppiin. Latausvirta voi olla suurimmillaan 63 A ja latauksessa käytetään sähköauton lataukseen tarkoitettua kolmivaiheista standardissa SFS-EN 62196-2 määriteltyä pistokytintä. Tällöin suurin saatavilla oleva latausteho on noin 44 kW. Tarkemmin tässä lataustavassa käytettyjä pistokytimiä on esitelty luvussa 3.2. (Sesko 2016; SFS-EN 61861-1:2011, 14).

Lataustavassa 4 eli tehollatauksessa sähköauton lataamiseen käytetään ulkopuolista tasasähkölaturia ja tällä lataustavalla saavutettavat lataustehot ovat satojen kilowattien luokkaa (latausvirta voi olla esimerkiksi 200 A jännitteen ollessa ≥ 500 Vdc). Lataustavassa 4 sekä peruslatauksessa pistokkeen yhteydessä on oltava myös sähköinen tai mekaaninen järjestelmä, joka estää pistotulpan irrottamisen, ellei pistoketta ole kytketty irti syötöstä. (Sesko 2016; SFS-EN 61861-1:2011, 14; Phoenix Contact 2017c)

Sähköajoneuvojen latauskaapelit voivat olla joko kiinteästi sähköajoneuvoon tai latauspisteeseen asennettuja tai irrallaan olevia. Jatkokaapelien käyttö sähköautojen latauksessa ei kuitenkaan ole sallittua. Lataustavoissa 2, 3 ja 4 ohjauslaiteyksikkö tarjoaa myös lisäominaisuuksia verrattuna lataustapaan 1. Ohjausyksikön tarjoamia ominaisuuksia ovat esimerkiksi

- ohjausyksikkö varmistaa, että sähköajoneuvo on oikein ja turvallisesti kytkettynä latauspisteeseen
- tarkistaa suojamaan olemassaolon ja kunnan resistanssia mittaamalla
- aloittaa ja lopettaa sähköajoneuvon lataustapahtuman
- ohjausyksikkö mahdollistaa myös latausvirran suuruuden automaattisen valinnan
- tarkastelee tuuletustarvetta latauksen yhteydessä
- tarkastelee latauspisteen latausvirran syöttökykyä ja rajoittaa sitä tarpeen mukaan
- huolehtii latauskaapelin lukituksesta lataustapahtuman ajan
- mahdollistaa tehonsyötön niin sähköverkosta ajoneuvoon kuin ajoneuvosta takaisin sähköverkkoon muiden komponenttien tukiessa kahdensuuntaista tehonsiirtoa. (SFS-EN 61851-1:2011, 15–17).

3.2 Latauspistokytkimet

Tässä luvussa tarkasteltavat latausliittimet liittyvät sähköautojen peruslataukseen (lataustapa 3) ja teholataukseen (lataustapa 4). Käytetyt latausliittimet vaihtelevat tarkasteltavasta maasta riippuen. Lataustapaan 3 liittyvät latauspistokytkimet ovat tarkemmin määriteltyinä standardissa SFS-EN 62196-2:2012 ja lataustavan 4 mukaiselle lataukselle standardissa SFS-EN 62196-3:2014. Euroopassa sähköautojen latausliittimiksi on valittu tyypin 2 liitin, joka on esitettyinä kuvassa 3.



KUVA 3. Lataustavassa 3 käytössä oleva tyypin 2 liitin ja sen kytkentäjärjestys (Phoenix Contact 2017a)

Tyypin 2 liittimessä kulkee kuvan 3 mukaisesti kolmen vaiheen, nollan ja suojamaan lisäksi kaksi erillistä ohjaussignaalia, CP (control pilot) ja PP (proximity plug). Näiden

ohjaussignaalien merkitystä sähköauton latauksessa on tarkemmin käsitelty luvussa 4.2. Samaa tyyppin 2 liittintä voidaan hyödyntää myös lataustavan 4 mukaisessa sähköauton latauksessa sekä yhdistetyssä AC-DC –latauksessa. (Phoenix Contact 2017a, 2017c).

Kuvassa 4 on esiteltyinä Pohjois-Amerikassa, Japanissa ja Australiassa käytössä oleva tyyppin 1 liitin (SAE J1772, Yakazaki) sekä Kiinassa käytössä oleva standardin GB/T mukainen liitin. Tyyppin 1 liittin mahdollistaa vain yksivaiheisen lataamisen, jolloin verkosta otettu virta on suurimmillaan 32 A ja latausteho 7,4 kW. Molemmat liittimet sisältävät kuitenkin samat ohjaussignaalit kuin Euroopassa käytössä oleva tyyppin 2 liitin ja GB/T –liittimellä voidaan toteuttaa kolmivaiheinen latausjärjestelmä. (Phoenix Contact 2017a).



KUVA 4. SAE J1772 ja GB/T latausliittimet (Phoenix Contact 2017a)

Kuvan 5 mukainen tyyppin 3 liitin (Scame) on ranskalaisten kehittämä vastine lataustavan 3 mukaiselle latauspistokkeelle, mutta sen käyttö ei ole yleistynyt Ranskan ulkopuolella. Tyyppin 3 mukaisen liittimen etuna on kiinteän suojaläpän tarjoama lisäsuoja, mutta liittimen rakenne vaihtelee latausvirrasta ja käytettyjen vaiheiden määrästä riippuen. Samaa tyyppin 2 liittintä käytetään niin 1- ja 3-vaiheisessa latauksessa latausvirroista riippumatta. (Mennekes 2013, 2).



KUVA 5. Scamen valmistamia tyyppin 3 liittimiä (Scame 2017)

Lataustavan 4 liittimet voivat olla yhdistelmäliittimiä (CCS, Combined Charging System), joista hyödynnetään tyyppin 1 tai 2 liittimien ohjaussignaaleja ja latausvirtaan käytetään erillisiä DC-pinnejä. Kuvassa 6 on esiteltyinä Pohjois-Amerikassa käytössä oleva Combo 1 –liitin ja Euroopassa käytettävä Combo 2 –liitin. (Phoenix Contact 2017c).



KUVA 6. CCS Combo 1 ja Combo 2 latausliittimet (Phoenix Contact 2017c)

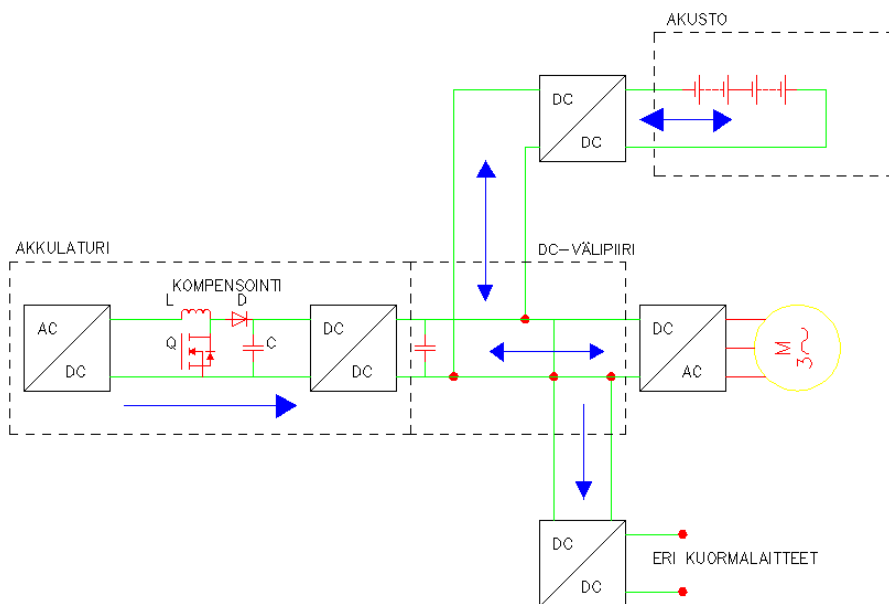
Vastaava kiinalaisen GB/T-latausstandardin mukainen yhdistelmäliitin on esitetty kuvassa 7 yhdessä CHAdeMo-standardin mukaisen pikalatausliittimen kanssa. CHAdeMO-liittimen suurin mahdollinen latausteho voi olla jopa 63 kW ja CCS-pikalatausliittimet mahdollistavat jopa 125 kW lataustehot. CHAdeMO-liitin on määritelty standardissa IEC 62196 tyyppin 4 liittimeksi. (Phoenix Contact 2017c).



KUVA 7. GB/T ja CHAdeMo latausliittimet (Phoenix Contact 2017c)

3.3 Sähköauton sisäinen tehonsiirtojärjestelmä

Sähköautojen lataamisessa hyödynnetään erilaisia suuntaajia, joiden tehtäviä ovat muuttaa vaihtojännite tasajännitteeksi (tasasuuntaajat), muuttaa tasajännite vaihtojännitteeksi (vaihtosuuntaajat) tai muuttaa tasajännite erisuuruiseksi tasajännitteeksi (hakkuriteholähteet). Suuntaajat rakennetaan tehopuoliyohteista, joista tärkeimpiä ovat piidiodit, tehotransistorit sekä tyristorit. Sähköautojen sisäisiä tehonsiirtojärjestelmiä voidaan kuvata kuvan 8 mukaisella järjestelmällä, jossa tehosiirron mahdolliset suunnat on kuvattu sinisillä nuolilla. Suuntaajat voivat tilanteesta riippuen toimia sekä tasa- että vaihtosuuntaajana. (Hietalahti 2011a, 63).

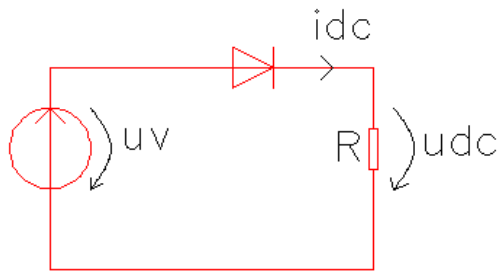


KUVA 8. Sähköauton sisäinen tehonsiirtojärjestelmä (Krein & Yilmaz 2013, 2154)

Järjestelmä yhdistetään sähköverkkoon akkulaturin välityksellä ja riippuen akkulaturista, voi tehonsiirto onnistua myös sähköauton akustolta takaisin verkkoon, mutta tyypillisesti tehonsiirto tapahtuu vain sähköverkosta autolle. Mikäli sähköautoja halutaan hyödyntää energiavarastoina, on niiden sisältämän tehoelektronikan tuettava myös kahdensuuntaista tehonsiirtoa.

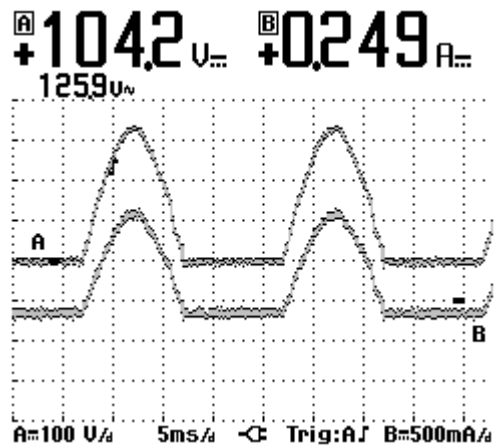
3.3.1 Tasasuuntaajat

Diodeja käytetään monissa erilaisissa tehoelektronikan sovelluksissa ja piidiodi on anodista ja katodista muodostuva puolijohdekomponentti, joka sallii virran kulun ainoastaan yhteen suuntaan. Yksinkertaisin tasasuuntaussilta saadaan kytkemällä diodi sarjaan kuormituksen kanssa kuvan 9 mukaisesti. (Hietalahti 2011b, 6, 35).



KUVA 9. Puoliaaltotasasuuntaaja (Hietalahti 2011b, 35)

Diodin läpi kulkee virtaa silloin, kun diodin anodilla olevan jännite on positiivinen katodiin nähden ja jännite on kynnyksjännitettä suurempi. Vastaavasti diodi estää virran kulun, kun katodin jännite on positiivinen anodiin nähden. Tällöin piirin virta ja jännite ovat kuvan 10 mukaisia, kun kuorma on puhtaasti resistiivinen eli virran ja jännitteen välillä ei ole vaihe-eroa. (Hietalahti 2011b, 35).

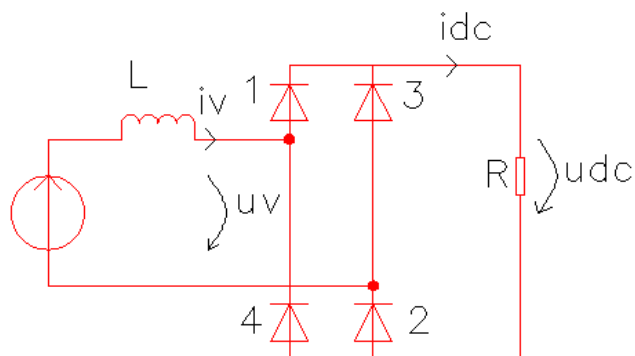


KUVA 10. Yksivaiheisen tasasuuntaussillan ulostulojännite ja -virta

Tasasuunnatun jännitteen keskiarvo voidaan laskea kaavan 1 mukaisesta lausekkeesta (Hietalahti 2011b, 35)

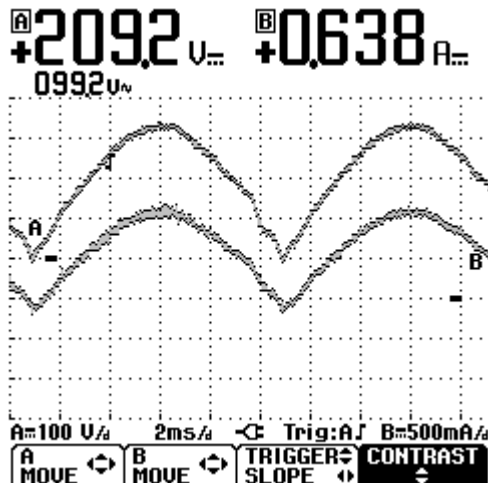
$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \sqrt{2} \cdot U_V \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_V = 0,45 \cdot U_V \quad (1)$$

Syöttöjännitteen ollessa 230 V, on ulostulojännite kaavan 1 mukaisesti $0,45 \cdot 230 \text{ V} = 103,5 \text{ V}$. Paremmalla hyötysuhteella oleva yksivaiheinen tasasuuntaussilta voidaan rakentaa käyttämällä neljää diodia kuvan 11 mukaisesti.



KUVA 11. Kokoaaltotasasuuntaaja (Hietalahti 2011b, 39)

Positiivisen puolijakson aikana johtavat diodit D1 ja D2 sekä vastaavasti negatiivisen puolijakson aikana johtavina ovat diodit D3 ja D4. Negatiivisen puolijakson aikana diodit D3 ja D4 kääntävät vaihejännitteen vaiheen 180° , jolloin syöttöjännitteen molemmat puoliskot saadaan hyödynnettyä eli kyseessä on kokoaaltotasasuuntaaja. Kokoaaltotasasuuntaajan ulostulojännite on kuvan 12 mukainen. (Hietalahti 2011b, 38).

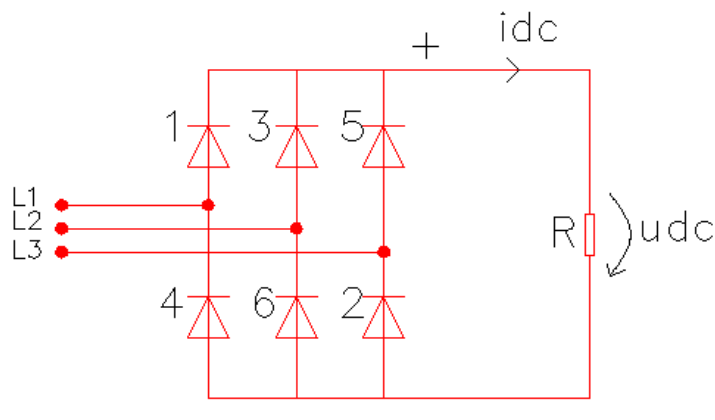


KUVA 12. Yksivaiheisen tasasuuntaussillan jännite ja virta

Tasasuunnatun jännitteen keskiarvo voidaan laskea kaavan 2 mukaisesta lausekkeesta (Hietalahti 2011b, 38).

$$U_{dc} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2} \cdot U_V \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_V = 0,90 \cdot U_V \quad (2)$$

Ulostulojännitteeksi saadaan kaavan 2 mukaisesti $0,90 \cdot 230 \text{ V} = 207 \text{ V}$. Yleisesti käytetty kolmivaiheinen tasasuuntaaja voidaan rakentaa kuuden diodin avulla kuvan 13 mukaisesti, jolloin jokaisen vaiheen osalta saadaan hyödynnettyä niin positiivinen kuin negatiivinenkin puolijakso. (Hietalahti 2011b, 44).

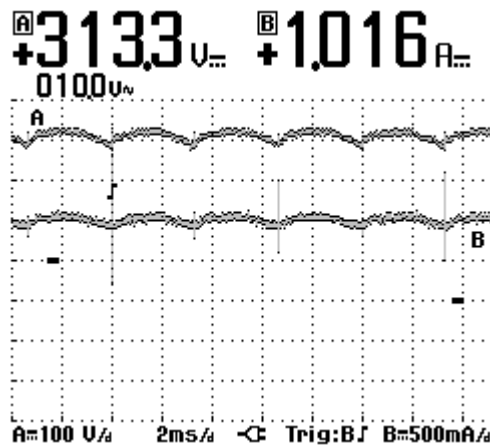


KUVA 13. Diodeilla toteutettu kuusipulssisilta (Hietalahti 2011b, 44)

Yleisesti kolmivaiheisia tasasuuntauskytkentöjä käytetään, kun haluttu tasasähköteho on tarpeeksi suuri, yleensä yli 2 kW (Hietalahti 2011b, 41). Kuusipulssisillalta saatavan tasajännitteen suuruus voidaan laskea kaavan 3 mukaisesti.

$$U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{-\pi/6} \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t) \cdot dt = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U = 1,35 \cdot U \quad (3)$$

Jos käytetty syöttöjännite (tässä tapauksessa pääjännite) on 230 V, saadaan tällöin tasajännitteeksi kaavan 3 mukaisesti $1,35 \cdot 230 \text{ V} = 310,5 \text{ V}$. Ulostulon jännite on nyt kuvan 14 mukaista.



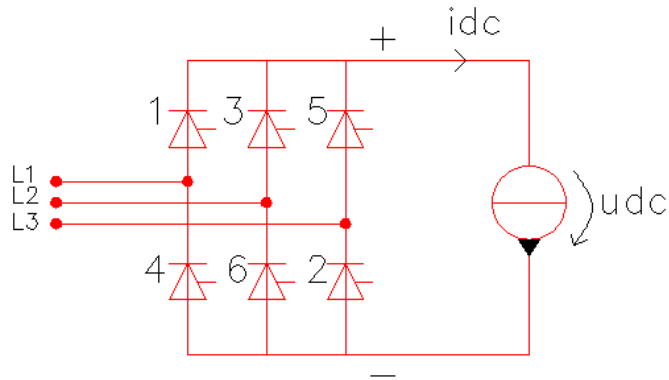
KUVA 14. Kuusipulssisillan ulostulojännite ja -virta

Kun halutaan tasoittaa saatavaa tasajännitettä, voidaan kuorman rinnalle sijoittaa sopivan kokoinen kondensaattori tai induktanssi kuorman kanssa sarjaan. Tällöin ongelmaksi muodostuvat verkkovirran harmoniset yliaallot (Hietalahti 2011b, 39–41). Yksivaiheisten suuntaajien ongelmana on myös niiden synnyttämän tasajännitteen aaltoisuus eli syöttöjännitteen ja tasajännitteen vaihtojännitekomponentin tehollisarvon suhde. Kun yksivaiheisella siltakytkennällä jännitteen aaltoisuus on 48,4 %, kuusipulssisilltaa käytettäessä jännitteen aaltoisuus on vain 4,12 %. (Hietalahti 2011b, 45).

3.3.2 Tyristorit ja ohjatut tasasuuntaussillat

Tyristori on nelikerroksinen puolijohdekomponentti, jossa on anodin ja katodin lisäksi ohjauselektrodi. Tyristori saadaan johtavaan tilaan ainoastaan, kun tyristorin hilalle tuodaan katodiin verrattuna riittävän suuri positiivinen jännitepulssi tyristorin ollessa

myötäestotilassa. Tyristorien avulla on mahdollista toteuttaa ohjattuja suuntauskytkentöjä. Kolmivaiheinen ohjattu tasasuuntauskytkentä voidaan muodostaa kuvan 15 mukaisesti. (Hietalahti 2011b, 19).

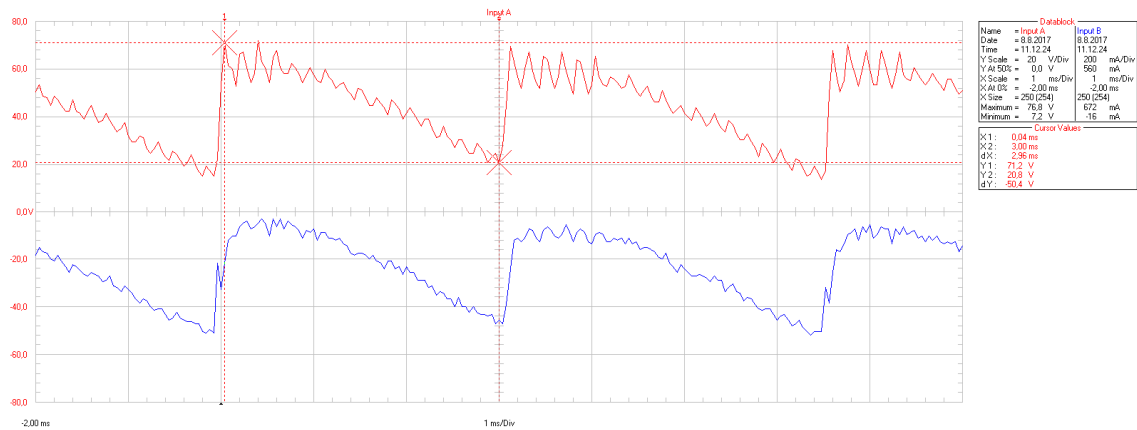


KUVA 15. Ohjattu kolmivaiheinen tasasuuntauskytkentä (Hietalahti 2011b, 48)

Ohjauskulmalla määritellään se ajanhetki, jolloin kulloinkin johtamisvuorossa oleva komponentti kytketään päälle. Tasajännitteen keskiarvon suuruus on laskettavissa vastaavasti kuin kuusipulssisillalle ohjauskulma α huomioituna kaavan 4 mukaisesti. (Hietalahti 2011b, 47–49).

$$U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{-\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) = 1,35 \cdot U \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

Tarkastellaan esimerkkinä tyristoreilla toteutettua kytkentää, jossa ohjauskulma on 45° . Tällöin suuntaussillalta saatavan jännitteen ja virran käyrämuodot ovat kuvan 16 mukaiset ohjauskulman ollessa 45° ja syöttöjännitteen ollessa 50,0 V. Kuormitus on ollut puhtaasti resistiivinen (kuormavastus 100 Ω) mittauksen yhteydessä. Mikäli kuormavastuksen kanssa olisi ollut sarjassa induktanssia, olisi virran ja jännitteen käyrämuotoja saatu tasoitettua.

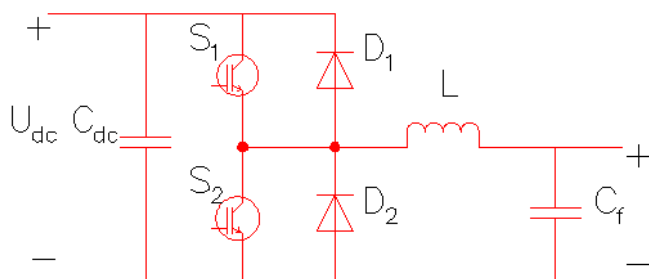


KUVA 16. Tyristorisillasta saatavan tasajännitteen ja -virran käyrämuodot

Ohjaukulman säätö lisää kuitenkin verkosta otettavaa ohjausloistehoa ja samalla kasvattaa verkosta otettavan virran säröä. Tyristorisillojen avulla tehonsiirto myös tasajännitepuolelta sähköverkkoon on mahdollista kasvattamalla ohjaukulman arvo yli 90° . Tällöin DC-kiskon jännite on negatiivinen ja tehon suunta DC-välipiiristä sähköverkkoon päin. (Hietalahti 2011b, 48).

3.3.3 Hakkuriteholähteet

Kun vaihtojännite on saatu muutettua tasajännitteeksi, voidaan sen portaattomaan säätöön käyttää hakkuriteholähteitä. Hakkuriteholähteet voidaan jakaa jännitettä alentaviin (Buck), jännitettä nostaviin (Boost) ja jännitettä nostaviin ja laskeviin hakkuriteholähteisiin (Buck-Boost). Näiden lisäksi on olemassa muita hakkuriteholähteitä, kuten Cúk-hakkuriteholähde, jännitteen kääntävä hakkuriteholähde, siltakytketyt hakkuriteholähteet ja ohjatut hakkuriteholähteet. Esimerkiksi kuvassa 17 esitetyn siltakytketyn hakkuriteholähteen avulla mahdollistetaan kaksisuuntainen tehonsiirto ja se koostuu kahdesta ohjattavasti puolijohdekytkimestä S_1 ja S_2 sekä näiden rinnalle kytkettävistä diodeista D_1 ja D_2 . Kytkennässä on myös lisänä suodinkela L sekä suodinkondensaattori C_f . (Hietalahti 2011b, 73–86).



KUVA 17. Siltakytetty hakkuriteholähde (Hietalahti 2011b, 81)

Hakkuriteholähteillä on myös mahdollista toteuttaa useampivaiheinen kaksisuuntainen suuntaaja, jolla on mahdollista siirtää useiden kymmenien kilowattien teho. Kytkenä koostuu esimerkiksi kolmesta erillisestä kuvan 17 mukaisesta puolisisiltakytkenästä, joita kutakin voidaan ohjata 120° vaihe-erolla toisiinsa nähden. Vaihevirtojen summautuessa toisiinsa niiden aaltoisuudet kumoavat osittain toisensa, jolloin kokonaisvirran aaltoisuus pienenee. (Hietalahti 2011b, 82–83).

3.4 Suuntaajien verkkovaikutukset ja yliaallot

Sähköverkossa esiintyvät epälineaariset kuormitukset ja niiden verkosta ottamat tai verkkoon syöttämät virrat kasvattavat sähköverkon vaihtojännitteiden ja -virtojen säröä eli niiden käyrämuodot eivät ole enää sinimuotoisia. Harmoniset yliaallot ovat perustaaajuksen 50 Hz sinikomponentin kerrannaisia ja niitä aiheuttavat sähköverkossa esimerkiksi:

- tasa- ja vaihtosuuntauskäytöt
- hakkuriteholähteet
- puolijohdekytkimet
- purkauslamput
- vikaantuneiden muuntajien ja moottorien magneettiipiirit. (Hietalahti, Männistö, Seesvuori, Seesvuori & Wilén 2006, 30).

Verkkojännitteiden yleisiä vaatimuksia on esitetty SFS-EN 50160:2010 jännitestandardissa. Jännitestandardissa on esitetty raja-arvot verkkojännitteen pienjänniteverkkojen osalta:

- taajuudelle
- jännitetason vaihteluille

- nopeille yksittäisille jännitemuutoksille
- jännitteen epäsymmetrialle
- välkynnän häiritsevyydelle
- harmonisille yliaalloille.

Näiden lisäksi standardissa on määriteltynä verkon vikatilanteita kuten käyttökeskeytyksiä, jännitekuoppia ja ylijännitteitä. Verkkojännitteen kokonaissärökertoimen on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin 8 % kun kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 asti ovat huomioituna. (SFS-EN 50160:2010, 20–28).

Virtasäröä ei käsitellä standardissa SFS-EN 50160 lainkaan, mutta on suositeltavaa, että virtasärö olisi tietyn raja-arvon mukainen. Alle 25 A nimellisvirrallisille sähkölaitteille suositusta ei ole, mutta nimellisvirraltaan 25 A - 200 A sähkölaitteiden virran kokonaissärö saisi olla enintään 10 % nimellisvirrasta. (Hietalahti ym. 2006, 44).

Särökerroin THD (Total Harmonic Distortion) määritellään kaavan 5 mukaisesti virralle ja jännitteelle, joka nyt kuvaa harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa perustajuiseen komponenttiin (kaavoissa perustajuutta kuvataan termillä F , fundamental). Särökerroin voi myös kuvastaa harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa jännitteen tai virran tehollisarvoon (Root mean square RMS, THD_R). (Hietalahti ym. 2006, 29).

$$THD_{i,F} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}}, \quad THD_{u,F} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} u_{n,rms}^2}}{U_{1,rms}} \quad (5)$$

Normaalisti tehokerroin PF määritetään pätötehon ja loistehon väliseksi suhteeksi kaavan 6 mukaisesti, jolloin sinimuotoisella jännitteellä tehokerroin määrittää myös virran ja jännitteen välisen vaihe-erokulman (Hietalahti 2011b, 56)

$$PF = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (6)$$

Kaava 6 on ainoastaan voimassa, kun verkkojännitteen särökerroin $THD_F \leq 2\%$. Tapauksessa, jossa verkkojännite on edelleen sinimuotoista, mutta kuormavirta on hyvin epäsinimäistä, voidaan tehokerroin määrittää kaavan 7 mukaisesti (Hietalahti 2011b, 56)

$$PF = \frac{U_{rms} \cdot I_{1,rms} \cdot \cos\varphi}{U_{rms} \cdot I_{rms}} = \frac{I_{1,rms} \cdot \cos\varphi}{I_{rms}} = K_p \cdot \cos\varphi \quad (7)$$

Kerroin K_p kuvastaa yliaaltojen suhdetta perusaaltoon nähden. Virran särökertoimen ja kertoimen K_p välillä pätee kaavan 8 mukainen yhteys

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (8)$$

Tasasuuntaajien verkosta ottama kuormitusvirta on epäsinimäistä, joka vaikuttaa myös verkon jännitteeseen. Epälineaariset kuormitukset aiheuttavat sähköverkossa ylimääräisiä häviöitä ja lämpenemää muuntajissa, kaapeleissa ja moottoreissa. Näiden lisäksi kolmella jaolliset yliaallot summautuvat nollajohtimeen ja tehokerroimen huonontuminen pienentää sähköverkon kykyä siirtää pätötehoa. Tyristorisiltojen ongelmana on myös niiden ottama ohjausloisteho, jonka suuruus riippuu käytetystä ohjauskulmasta. Ohjausloistehon aiheuttaman verkkovirran perusaallon siirtymisen vuoksi syöttävä sähköverkko näkee tyristorisillan induktiivisena kuormituksena. (Hietalahti 2011b, 49, 55).

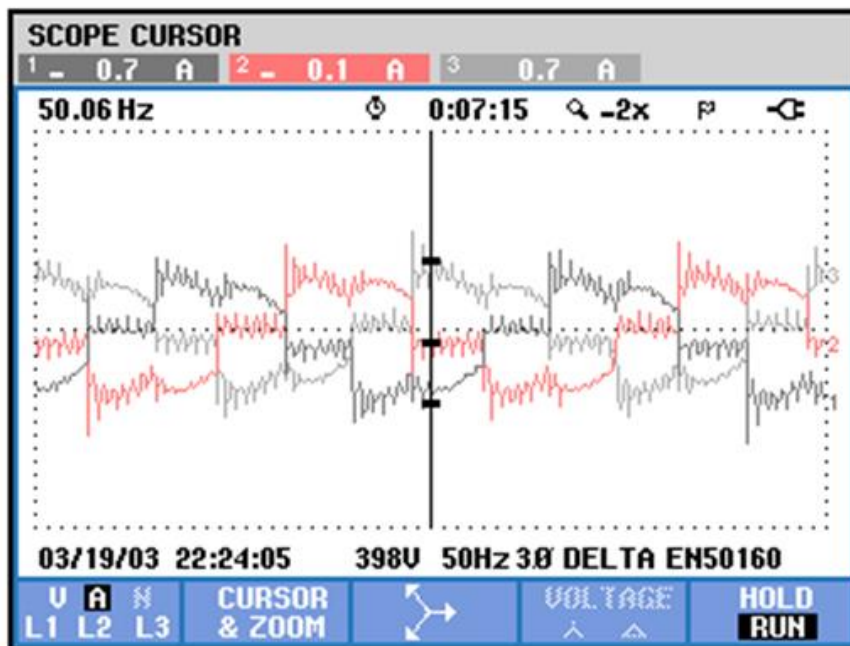
Epälineaarisen kuormituksen tuottamia ongelmia ovat myös mahdolliset resonanssitilanteet ja niistä aiheutuvat ylijännitteet. Lisäksi epäsinimäinen jännite aiheuttaa toiminnallisia häiriöitä sähkölaitteisiin sekä häiriöitä signaalikaapeleihin ja mittalaitteisiin. Yksivaiheiset tasasuuntaajat aiheuttavat kolmatta yliaaltoa ja sen kerrannaisia, kun taas kolmivaiheisilla tasasuuntaajilla ne ovat merkityksettömiä (Hietalahti 2011b, 57, 67).

Tarkastellessa kolmivaiheista latausta tukevaa Brusa NLG664 sähköauton sisäistä akkulaturia, valmistajan ilmoittamien teknisten tietojen mukaan laturin tehokerroin $PF > 0,99$ (Brusa 2017, 2). Laturin ottaman verkkovirran särökerroin voi tästä huolimatta olla hyvinkin suurta. Erään autovalmistajan sähköautoa ladatessa verkkovirran särökerroin oli latauksen alkuvaiheessa 3 % ja se kasvoi aina 28,11 % asti latauksen loppuvaiheessa. Kaavan 8 mukaan laskettuna tässä tapauksessa saatava tehokerroin olisi

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + (0,2811)^2}} = 0,96268 \dots \approx 0,96 \quad (8)$$

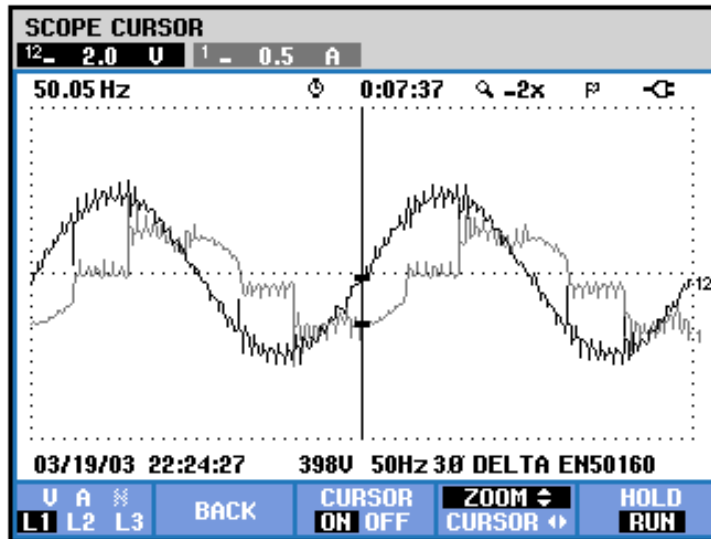
Tämä vastaisi tehokertoimen PF arvoa 0,96 kaavan 8 mukaisesti laskettuna. Suuri määrä ladattavia sähköautoja heikentää sähköverkon sähkönlaatua merkittävästi etenkin suuria lataustehoja käytettäessä. (Afonso, Ferreira, Gonçalves, & Monteiro 2012, 151).

Tyristoreilla toteutetun ohjatun kolmivaiheisen tasasuuntaussillan verkkovaikutuksia tutkittiin mittaamalla niiden ottaman verkkovirran yliaaltojakaumaa. Käytetty mittari oli Fluke 435 -tehoanalysaattori. Tarkasteltavan tyristorisillan ohjaukskulma oli 45° ja kuormana käytettiin 100Ω vastusta sekä sen kanssa sarjassa 80 mH induktanssia. Kuvassa 18 näkyy sillan ottaman verkkovirran käyrämuoto, kun syöttävän verkon pääjännite oli $49,90 \text{ V}$ ja otettu virta $I_{rms} = 0,43 \text{ A}$.



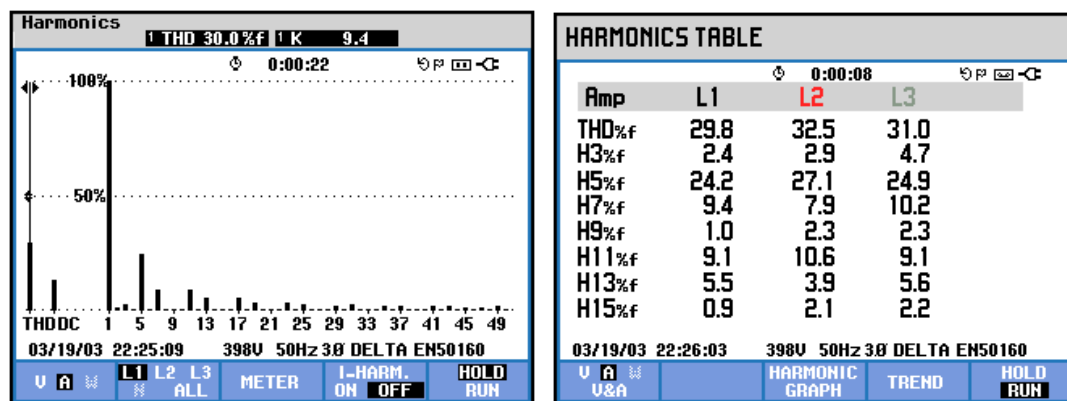
KUVA 18. Tyristorisillan ottaman verkkovirran käyrämuoto (vaiheen 1 virta merkittynä tummanharmaalla, vaiheen 2 punaisella ja vaiheen 3 vaaleanharmaalla)

Yhden vaiheen osalta verkkojännite ja -virta käyttäytyivät kuvan 19 mukaisesti.



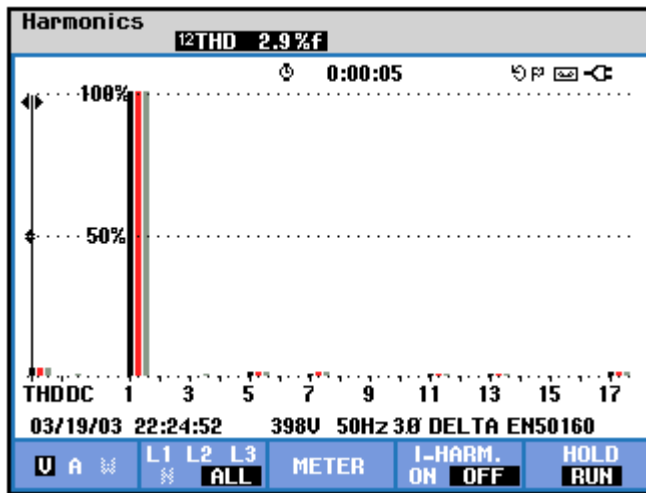
KUVA 19. Yhdestä vaiheesta mitatun verkkovirran ja -jännitteen käyrämuoto (verkkovirta harmaalla värillä)

Kuvassa 20 on vastaavasti esitettyä verkkovirran yliaaltojakauma kyseisessä tilanteessa.



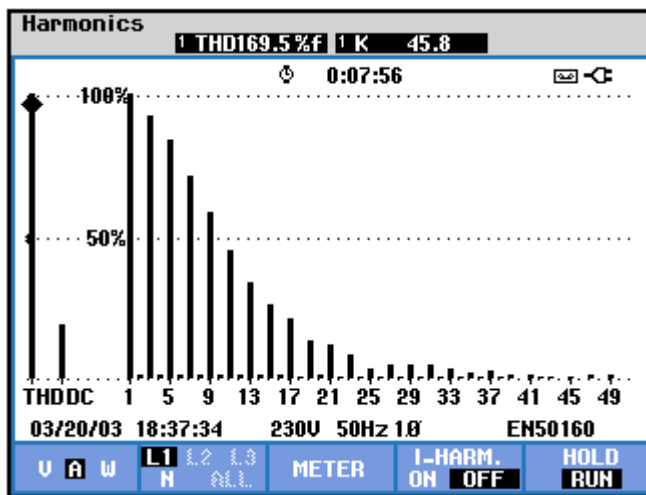
KUVA 20. Verkkovirran yliaaltojakauma

Harmoniseksi säröksi mitattiin 30 % kaikki vaiheet huomioituna ja merkittävimmät yliaallot olivat 5., 7., 11. ja 13. yliaalto. Vastaavasti jännitteen kokonaissärö pysyi melko pienenä kuvan 21 mukaisesti.



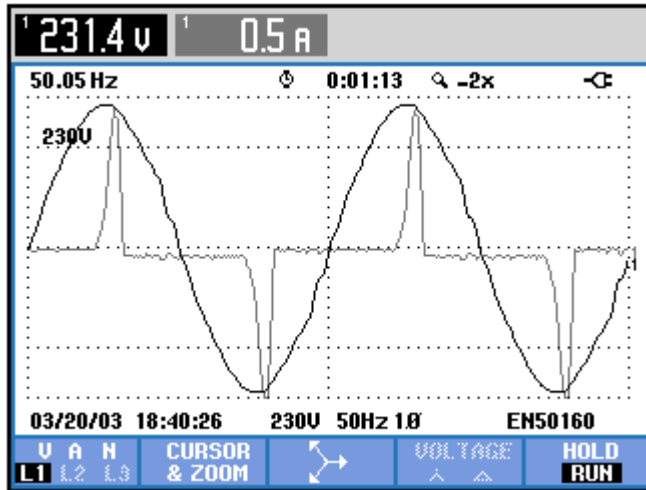
KUVA 21. Verkkojännitteen yliaaltojakauma

Vastaava tarkastelu tehtiin Mascot Type 8921 230Vac/24Vdc –hakkuriteholähteelle. Edelleen yliaaltojakauman tarkastelussa hyödynnettiin Fluke 435 –tehoanalysaattoria. Nyt mitattu tasajännite oli 23,85 V ja –virta 1,946 A, kun kuormana käytettiin edellisen mittauskytkennän vastusta ja induktanssia. Hakkuriteholähde tässä tapauksessa otti verkosta 0,489 A suuruisen virran, jonka yliaaltojakauma on esitettyinä kuvassa 22.



KUVA 22. Yksivaiheisen hakkuriteholähteen yliaaltojakauma

Havaitaan harmonisen särökertoimen olevan hyvin suuri, johtuen hyvin piikkimäisestä virrasta, jonka hakkuriteholähde ottaa sähköverkosta kuvan 23 mukaisesti.

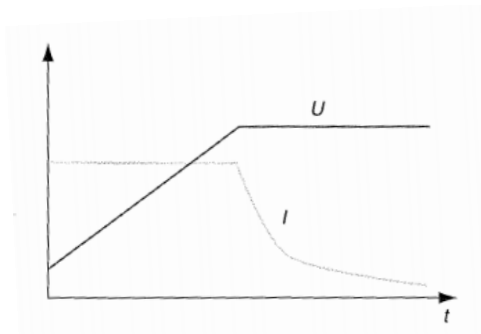


KUVA 23. Hakkuriteholähteen ottama verkkovirta ja verkon jännite

3.5 Akkujen lataaminen ja olosuhteiden vaikutus

Akkujen latauksessa voidaan hyödyntää muutamia yleisiä menetelmiä. Yksinkertaisin lataustapa on vakiojännitteellä tapahtuva lataaminen ja se soveltuukin kaiken tyyppisille akuille. Kun akun latausjännite pysyy vakiona, on latausvirran muututtava latausprosessissa ja tyypillisesti latausvirta on suuri latauksen alussa. Akun varaustilan kasvaessa latausvirtaa voidaan vastaavasti rajoittaa. Toisessa lataustavassa hyödynnetään vakiovirtaa, jolloin akun varaustila kasvaa lineaarisesti. (Garcia-Valle & Peças Lopes 2013, 22).

Tyypillisesti akkujen lataamisen käytetään kahden aiemmin mainitun menetelmän yhdistelmää eli latauksen alkuvaiheessa latausvirta pidetään vakiona, jolloin verkosta otettu teho ei kasva liian suureksi. Latauksen loppuvaiheessa jännite pidetään vakiona, jolloin latausvirta pienenee kuvan 24 mukaisesti.



KUVA 24. Latauskäyrä (Pistoia 2010, 519)

Suurien akustojen yhteydessä on myös yleensä hallintaelektroniikka, josta käytetään nimitystä BMS (Battery Management System). BMS varmistaa akun turvallisen käytön ja pidentää sen elinikää hallitsemalla akun kytkentätilannetta sekä sen suorituskykyä. Suorituskyvyn hallinnassa järjestelmä tarkastelee akun varaustilaa, lämpötilaa, jännitettä ja virtaa sekä rajoittaa tehoa tarpeen mukaan tai siirtää akun virransäästötilaan. BMS myös sisältää akkuun liittyviä suojausjärjestelmiä, kuten ylilataus-, ylipurkaus-, ylivirta-, oikosulku- ja lämpötilasuojausjärjestelmät. (Hietalahti 2011a, 101).

Jos tarkasteluun otetaan tyypillinen 22 kWh sähköauton akku, sen latausajat riippuvat lataustehosta taulukon 1 mukaisesti

TAULUKKO 1. Akkujen lataamiseen kuluva aika eri lataustavoilla (Schneider 2014, 11)

Lataustapa ja -teho	Akun täyteen lataamiseen kuluva aika	30 minuutissa saavutettu lataus (%)
Lataustapa 2 (1~, 2kW)	12 h	4 %
Lataustapa 3 (1~, 7 kW)	5 h	10 %
Lataustapa 3 (3~, 22 kW)	1h 30 min	34 %
Pikalataus (43 kW)	30 min	100 %

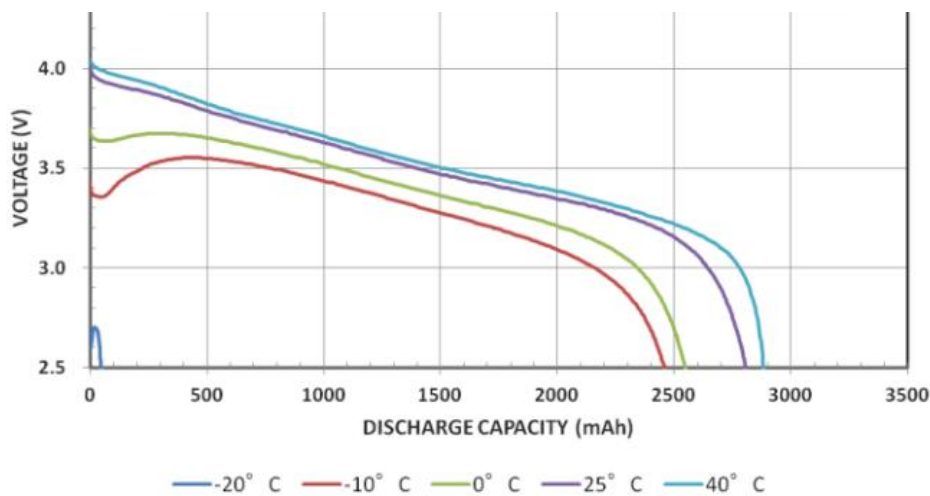
Akkujen lataustason määrittäminen tarkasti on hyvin hankalaa, jolloin latauksen loppumisajankohdan määrittelyssä voidaan hyödyntää eri menetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi ajastimen käyttö, lämpötilarajan tarkkailu, lämpötilan muutosnopeuden tarkkailu, minimivirtarajan käyttö, jänniteraja, jännitteen muutosnopeus ja etenkin NiMH-akuilla käytetty jännitteen tippumisen tarkkailu, kun akku on ladattu täyteen. Akkujen on myös kestettävä regeneroivan jarruttamisen tuottama satunnainen latausvirta. Regeneroivasta jarrutuksesta saatava teho voi olla satojen kilowattien luokkaa, jonka takia akkujen turvallisen toiminnan takaamiseksi latausteho on rajoitettu, joten voimakkaassa jarrutuksessa apuna toimivat myös mekaaniset jarrut. Regeneroivaa jarrutusta ei yleensä käytetä kylmissä olosuhteissa, sillä se saattaisi vaurioittaa kylmää akkua. (Garcia-Valle ym. 2013, 23–24; MIT Technology Review 2013).

Suomen olosuhteista myös ulkolämpötila asettaa tiettyjä vaatimuksia akkujen lataamisen suhteen. Tyypillisesti sähköautoissa käytettyjen litiumionikemien lämpötilarajat on määriteltävä taulukon 2 mukaisesti.

TAULUKKO 2. Panasonic NCR18650-kennon käyttölämpötilat (EV West 2017)

Lataus	0 – 45 °C
Tyhjennys	-20 – 60 °C
Säilytys	-20 – 50 °C

Alle 10 °C lämpötilassa latausvirran kapasiteettikerroin on 0,5 C eli Panasonicin kennon tapauksessa latausvirta kylmässä olisi puolet nimellisarvosta ollen noin 0,95 A. Kuvassa 25 on esitettyä akkukennon mahdollista purkauskapasiteettia eri lämpötiloissa. Kuvasta 25 havaitaan, että kylmissä olosuhteissa akun mahdollinen purkauskapasiteetti pienenee merkittävästi. Kylmien akkujen lämmityksessä apuna voidaan hyödyntää akkujen kasvanutta sisäistä resistanssia, jolloin akkua purettaessa kasvanut sisäinen resistanssi aiheuttaa ylimääräistä lämpenemistä, mikä kylmien akkujen tapauksessa osaltaan palauttaa kennon toiminnallisuutta. Akun sisäinen resistanssi voi olla kymmenkertainen -20 °C lämpötilassa verrattuna huonelämpötilassa olevaan akkuun. (Ji & Wang 2013, 1; EV West 2017).



KUVA 25. Panasonic NCR18650 litiumionikennon purkauskapasiteetti eri lämpötiloissa (EV West 2017)

3.6 Älykäs verkko ja Vehicle-to-grid (V2G)

Sähköautojen ja niiden latauspisteiden yleistymisen aiheuttaa ongelmia sähköverkon kuormitettavuuden kannalta, mikäli sähköautojen lataaminen tapahtuu ohjaamattomana. Sähköautojen lataaminen todennäköisesti ajoittuisi ajankohtaan, jolloin sähköverkossa on muutenkin kuormitushuippu. Tämä voisi johtaa verkon ylikuormittumiseen tai

sähköverkko olisi ylimitoitettava. Ohjauksessa voidaan hyödyntää latauksen viivästämistä tai sen ajoittamista jonkin kriteerin mukaan. (Alahäivälä 2012, 19).

Latauksen ohjaus voidaan toteuttaa joko keskitetysti verkkoyhtiön puolelta tai käyttäjä voi vastata itse oman latauksensa ajastamisesta. Keskitetyssä ohjauksessa lataus voidaan kytkeä pois päältä verkon liiallisen kuormituksen takia tai sähkön hinnan perusteella. Iltaisin sähköautojen latausta voisi viivästyttää muutamalla tunnilla tai erillisillä hintakannustimilla sähköautojen lataus voitaisiin siirtää haluttuun ajankohtaan. (Alahäivälä 2012, 19–20).

Sähköverkon ja latauspisteiden välistä kommunikaatiota voidaan hyödyntää käyttäjien tunnistamisessa, jolloin mahdollinen laskutus voidaan kohdistaa oikeisiin henkilöihin. Kysynnänjouston toteuttaminen tarvitsee myös sähköverkon ja latauspisteen välistä kommunikaatio, jolloin sähköautot voidaan ladata verkon kuormituksen kannalta edulliseen ajankohtaan. Tällöin käyttäjän kannalta sähköauton lataaminen voidaan ajoittaa siten, että sähkön hinta on matalimmillaan. (Pistoia 2010, 530–533).

Sähköautojen latauspisteiden ja sähköverkon välinen kommunikaatio voidaan jakaa neljään eri luokkaan. Näistä ensimmäisessä latauspiste toimii, kuten mikä tahansa tavallinen kuorma eikä kuormitusta ohjata älykkäästi. Seuraava taso vastaavasti sisältää kuormituksen älykkään ohjauksen ja kommunikaation sähköverkon kanssa. Seuraava taso eli V2G (Vehicle-to-Grid) sisältää samat toiminnot kuin aikaisempi, mutta siinä sähköautojen akuissa olevaa energiaa voidaan siirtää takaisin sähköverkkoon tarpeen mukaan. Sähköveron sijaan sähköautosta energiaa voidaan siirtää kaksisuuntaisesti asuinrakennuksen ja akuston välillä (Vehicle-to-Building). (Garcia-Valle ym. 2013, 26).

Kiinteistöjen yhteydessä sähköautoja voidaan hyödyntää kuormituksen tasaamiseen ja niiden avulla voidaan toteuttaa kysynnänjoustoja. Etäluettavien mittarien tarjoamien mittaustietojen avulla saadaan tietoa verkon kuormitusasteesta sekä erilaisista vikatilanteista hyvin nopeasti. Kuormien ohjauksen taustalla voivat olla sähkön markkinahinta, sähkön myyjän pyyntö tai verkkotaajuus.

Sähköautoja akustoja voidaan hyödyntää sähköverkon tukena niin normaalin toiminnan aikana esimerkiksi taajuuden säätelyyn ja kuormitushuippujen tasaamiseen. Vikatilanteissa vastaavasti sähköautoja voidaan hyödyntää nopeasti käynnistyvien

varavoimalähteiden rinnalla hetkellisissä sähkökatkoissa (<2 h). Sähköautojen akkujen hyödyntäminen onnistuu myös verkon hetkellisessä ylikuormituksessa sekä hetkellisissä sähkökatkoissa, mutta pidemmissä katkoissa sähköautojen hyödyntäminen varavoimalähteenä ei ole mahdollista. Yksittäisten autojen kohdalla akun varaustason seuranta on tärkeää, sillä käyttäjän on tarpeen mukaan päästävä liikkeelle autollaan. Sähköautojen yleistyessä akkujen kuormitus voidaan mitoittaa jokaisen sähköauton kohdalla erikseen niiden akun varaustason mukaisesti. Ongelmaksi voi muodostua kuinka käyttäjät saadaan mukaan tarjoamaan sähköautojensa akkukapasiteettia sähköverkkoon. (Ghosh, Rajakaruna & Shahnia 2015, 318–325).

4 LATAUSPISTEEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käydään läpi tarkemmin latauspisteen rakentamiseen liittyviä komponentteja ja niiden ominaisuuksia sekä tarkastellaan latauspisteen prototyypin kytkentäkaaviota tarkemmin.

4.1 Lataussäädin

Sähköauton latauspisteen suunnittelun lähtökohdaksi ulkovalaistusverkon yhteyteen valittiin lataustapaa 3 tukeva lataussäädin. Tällainen säädin on esimerkiksi kuvassa 26 esitetty Phoenix Contact EM-CP-PP-ETH, joka lopulta valittiin latauspisteeseen. Latauspistokkeeksi valittiin Suomessa ja Euroopassa yleisesti käytössä oleva tyyppin 2 pistoke, joka tukee niin yksi- kuin kolmivaiheista latausta. Komponenttivalinnoissa oli myös huomioitava olosuhteiden vaikutus eli tyyppillisesti pakkasenkestävyyden on oltava vähintään -25 °C Suomessa ulkotiloihin sijoiteltavilla laitteilla (Sesko 2016, 2).



KUVA 26. Phoenix Contact lataussäädin (Phoenix Contact 2015)

Komponenttivalinnoissa lähtökohdaksi valittiin lataustavan lisäksi 32 A latausvirta. Lataussäädin mahdollistaisi tätäkin korkeammat latausvirrat aina 63 A asti. Valittavien komponenttien virrankeston on oltava siis vähintään 32 A. Kun latauspiste on kytkettyä

kolmivaiheisesti sähköverkkoon, on tällöin suurin mahdollinen latausteho kaavan 9 mukaisesti.

$$P_{lataus,3\sim} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} \cdot 1 = 22,2 \text{ kW} \quad (9)$$

Mikäli latauspiste kytketään yksivaiheisesti, suurin saatavilla oleva latausteho on tällöin

$$P_{lataus,1\sim} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 230 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} \cdot 1 = 7,4 \text{ kW}$$

Todellisuudessa lataustehojen on oltava pienemmät kuin 32 A, sillä ulkovalaistusverkossa on nykyisellään käytössä lähdoissä B25 A johdonsuojakatkaisijat (Liite 2). Mikäli niiden kokoa kasvatettaisiin, onnistuisi latauspisteen mahdollistaman 32 A latausvirran hyödyntäminen myös ulkovalaistusverkon yhteydessä.

Lataussäätimen tehtävänä on hallita ja valvoa sähköautojen latausta. Säädin on kytketty kiinteästi sähköverkkoon lataustavassa 3 ja sen avulla ohjataan kontaktoria, joka yhdistää sähköauton sähköverkkoon lataustapahtumassa. Lataussäädin ja ladattava sähköauto myös kommunikoivat eri signaalien avulla keskenään. Ohjaussignaalit on esitelty tarkemmin luvussa 4.2. (Phoenix Contact 2015, 7).

Muita lataussäätimen ominaisuuksia ovat latausvirran rajoittaminen välillä 6 – 80 A ja erilaiset lukitusmahdollisuudet. Lataussäädin sisältää myös useita digitaalisia tuloja ja lähtöjä ja lataussäätimeen voidaan yhdistää tehonmittaus. Lataussäädin voidaan myös asettaa hylkäämään kaapelit, joiden kuormitettavuus on liian pieni. (Phoenix Contact 2015, 7).

Lataussäätimen hallinta tapahtuu joko säätimessä itsessään olevien dippikytkimien avulla tai erillisen etähallintaohjelmiston kautta. Etähallintaohjelmistoa voidaan käyttää selainpohjaisesti. Dippikytkimien toiminta on esitetty taulukossa 3. (Phoenix Contact 2015, 14).

TAULUKKO 3. Lataussäätimen dippikytkimien toiminnot (Phoenix Contact 2015, 14)

Kytkin	Toiminto
1	PX-signaalin käyttö, päällä kun latauspisteessä ei ole kiinteää kaapelia.
2	PX-signaalin tarkastelu, ON = hylätään latauskaapelit, joiden kuormitettavuus on liian pieni.
3	PX-valinta, ON = hylätään kaapelit, joiden kuormitettavuus on 13 A, OFF = hylätään kaapelit, joiden kuormitettavuus on 13/20 A.
4	Lukitus, ON = lukitus on käytössä.
5	Lukitustapa, ON = DC-moottori, OFF= solenoidi.
6	Lukitusvarmennus, ON = lukitus varmistetaan sisääntulosta LD.
7	Lataustapahtuman käynnistys, ON = latauksen käynnistyminen tarvitsee signaalin sisääntulosta EN.
8	Latauspisteen valmius, ON = tarkastellaan latauspisteen valmiutta lataamiseen sisääntulosta XR.
9	Manuaalinen lukitus, ON = tarkastellaan lukitusta sisääntulosta ML.
10	Latauksen käynnistys verkon välityksellä, ON = tarkastellaan latauksen käynnistymistä Modbus-rekisterin välityksellä.

Etähallintaohjelmiston kautta lataussäätimen toimintaa voidaan tarkastella reaaliajassa. Kuvassa 27 on esitettyä verkkokäyttöliittymä ja sen tarjoamat ominaisuudet.

The screenshot shows the web interface for the Phoenix Contact EV Charge Control. The interface is divided into four main sections: STATUS, CONFIGURATION, NETWORK, and ENERGY. The STATUS section is currently selected and displays the following information:

- Status acc. IEC61851-1 (A-F)**: A dropdown menu with options A, NA, 0 A, and 00:00.
- Proximity / Current Capability of Cable Assembly (A)**: A dropdown menu with options 0, off, unlocked, and low.
- Actual Charge Current Setting (A / "Digital")**: A dropdown menu with options off, unlocked, and low.
- Active Charging Duration (hh:mm)**: A dropdown menu with options 0, off, unlocked, and low.
- Energy Charge Sequence (kWh)**: A dropdown menu with options 0, off, unlocked, and low.
- EN - Enable Charging**: A dropdown menu with options off, unlocked, and low.
- XR - External Release, EVSE available**: A dropdown menu with options off, unlocked, and low.
- LD - Connector Locking Detection**: A dropdown menu with options unlocked, low, and low.
- ML - Manual Locking / Requested Locking Status**: A dropdown menu with options unlocked, low, and low.
- CR - State B and PWM on**: A dropdown menu with options low, low, and low.
- LR - Locking request**: A dropdown menu with options low, low, and low.
- VR - State C or D**: A dropdown menu with options low, low, and low.
- ER - State E or State F (Error)**: A dropdown menu with options low, low, and low.

A 'submit' button is located at the bottom right of the interface.

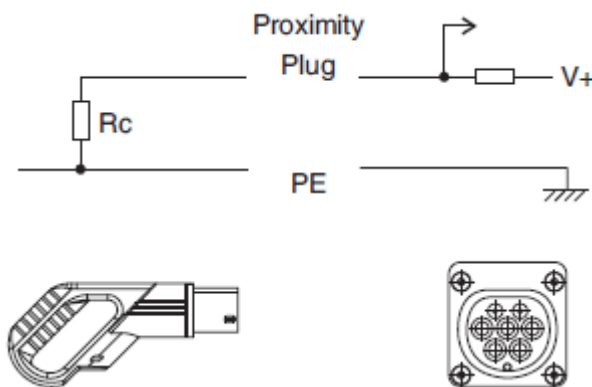
KUVA 27. Lataussäätimen etähallintaohjelmisto (Phoenix Contact 2015, 84)

Etähallintaohjelmistosta nähdään ladattavan sähköauton nykyinen tila, latauskaapelin kuormitettavuus, todellinen latausvirta, latauksen kesto ja eri tulojen tilat. Latausvirran asettamisessa voidaan hyödyntää lataussäätimen kiertokytkintä tai se voidaan määrittää PX-signaalin avulla. Vaikka latauskaapelin kanssa olisi mahdollista hyödyntää suurempiakin latausvirtoja, voidaan ne rajoittaa kiertokytkimen avulla pienemmäksi. (Phoenix Contact 2015, 84).

Muita etähallinnan tarjoamia mahdollisuuksia ovat lataussäätimen asetusten muuttaminen Configuration-välilehdeltä, verkkoasetuksien muuttaminen Network-välilehdeltä ja energiamittarin tarjoamien tietojen lukeminen Energy-välilehdeltä, mikäli energiamittari on yhdistetty lataussäätimeen. (Phoenix Contact 2015, 88–94).

4.2 Ohjaussignaalit

Suurin sallittu latausvirta määritellään PX-signaalin avulla mittaamalla vastuksen R_c arvoa kuvan 28 mukaisesti.



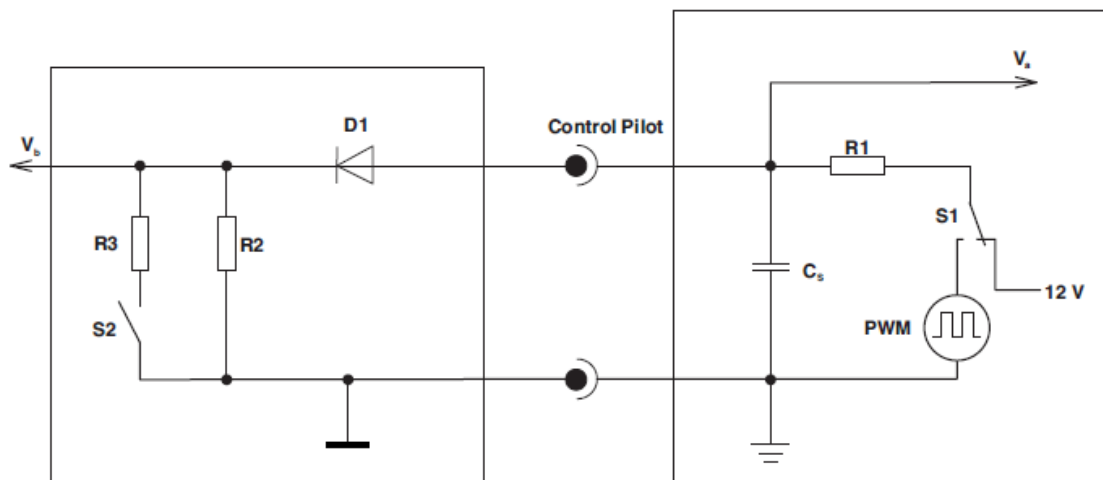
KUVA 28. PX-signaalin mittaaminen kaapelista (Phoenix Contact 2015, 21)

Käytössä olevan latauskaapelin ja liittimen suurin sallittu virta voidaan määrittää tällöin taulukon 4 mukaan. Taulukon 4 arvot ovat määriteltyinä standardissa SFS-EN 61851-1:2011. (Phoenix Contact 2015, 21).

TAULUKKO 4. Sallitut latausvirrat eri vastusarvoille (Phoenix Contact 2015, 21)

R_c (Ω , standardin mukainen arvo)	R_c (Ω , mitattu arvo)	Määritelty latausvirta
-	< 75	Virhe
100	75 ... 150	63 A (70 A)
220	150 ... 330	32 A
680	330 ... 1000	20 A
1500	1000 ... 2200	13 A
-	> 2200	0 A

CP-signaali vastaavasti määrittelee suojajohtimen olemassaolon ja sähköauton eri olotilat (auto yhdistetty latauspisteeseen, lataustapahtuman eri vaiheet ja lataustapahtuman virhetilat) sekä välittää tiedon suurimmasta sallitusta latausvirrasta sähköautolle. Yksinkertaistettu CP-signaalin kytkentäkuva on esitettyä kuvassa 29 (Phoenix Contact 2015, 22)



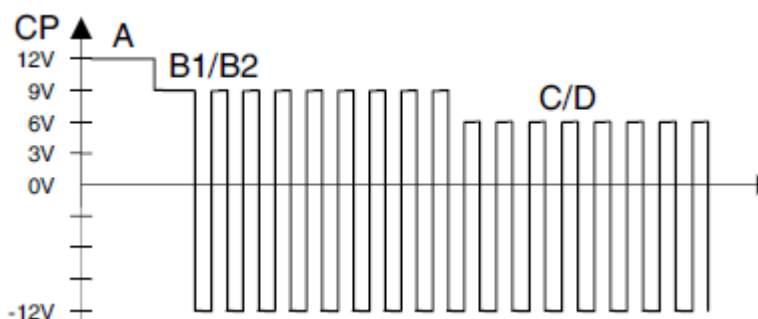
KUVA 29. Yksinkertaistettu CP-signaalin rakennekuva (Phoenix Contact 2015, 22)

Lataustapahtumaa ja sen eri vaiheita säädellään kytkimien S_1 ja S_2 avulla. Latauksen eri vaiheet määritellään taulukon 5 mukaisesti.

TAULUKKO 5. Sähköauton latauksen eri vaiheet (Phoenix Contact 2015, 24)

Latauksen vaihe	Auto kytkettynä	Kytkin S_2	Lataus mahdollista	V_a	Muuta
A	Ei	Avoin	Ei	12 V	$V_b = 0$ V
B	Kyllä	Avoin	Ei	9 V	R_2 havaittuna
C	Kyllä	Kiinni	Kyllä	6 V	Ei tuuletusta
D	Kyllä	Kiinni	Kyllä	3 V	Erillinen tuuletus vaaditaan
E	Kyllä	Avoin	Ei	0 V	Oikosulku lataussäätimellä, $V_b = 0$ V
F	Kyllä	Avoin	Ei	-	Latausjärjestelmä ei käytössä

Vaiheessa A latauspistoketta ei ole kytkettynä latauspisteeseen, jolloin mitattu jännite V_b on 0 V. Kun latauspistoke kytketään latauspisteeseen, saadaan jännite V_b mitattua vastuksien R_1 ($1,0 \text{ k}\Omega \pm 3 \%$) ja R_2 ($2,74 \text{ k}\Omega \pm 3 \%$) sekä diodin D_1 yli. Tällöin mittaussignaali on aluksi 9 V tasajännitettä ja kun latauspiste on valmis aloittamaan latauksen, mittaussignaali muutetaan 9 V PWM-signaaliksi. Kytkin S_2 suljetaan ainoastaan siinä vaiheessa, kun sähköauto on valmis vastaanottamaan latausvirtaa eli vaiheissa C ja D. Tämän seurauksena sähköauto havaitsee PWM-signaalin ja kytkee vastuksen R_2 rinnalle toisen vastuksen R_3 ($1,3 \text{ k}\Omega \pm 3 \%$ tapauksessa, jossa erillistuuletusta ei tarvita). Tällöin mitattava jännite V_b ilmaisee erillisen tuuletuksen tarpeen ($V_b = 3$ V) vai ei ($V_b = 6$ V). Kuvassa 30 on esitetty CP-mittaussignaalin muoto eri latausvaiheissa. (Phoenix Contact 2015, 25).



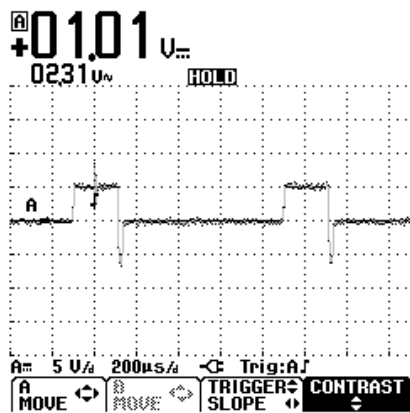
KUVA 30. CP-signaali latauksen eri vaiheissa (Phoenix Contact 2015, 25)

Pulssisuhteen avulla määritellään suurin sallittu virta, jonka sähköauto voi vastaanottaa. Sallitut latausvirrat määritellään taulukon 6 mukaisesti eri pulssisuhteen arvoille.

TAULUKKO 6. Pulssisuhteen avulla määritellyt latausvirrat (Phoenix Contact 2015, 26)

Pulssisuhte D_{on}	Latausvirta
$D_{on} < 3\%$	-
$3\% \leq D_{on} \leq 7\%$	Käytössä ulkoinen DC-laturi
$7\% < D_{on} < 8\%$	-
$8\% \leq D_{on} < 10\%$	6 A
$10\% \leq D_{on} \leq 85\%$	Latausvirta = $D_{on} \times 0,6$ A
$85\% < D_{on} \leq 96\%$	Latausvirta = $D_{on} \times 2,5$ A
$96\% < D_{on} \leq 97\%$	80 A
$D_{on} > 97\%$	-

Latauspisteen testauksen yhteydessä CP-signaalin pulssimuoto myös mitattiin kuvan 31 mukaisesti.



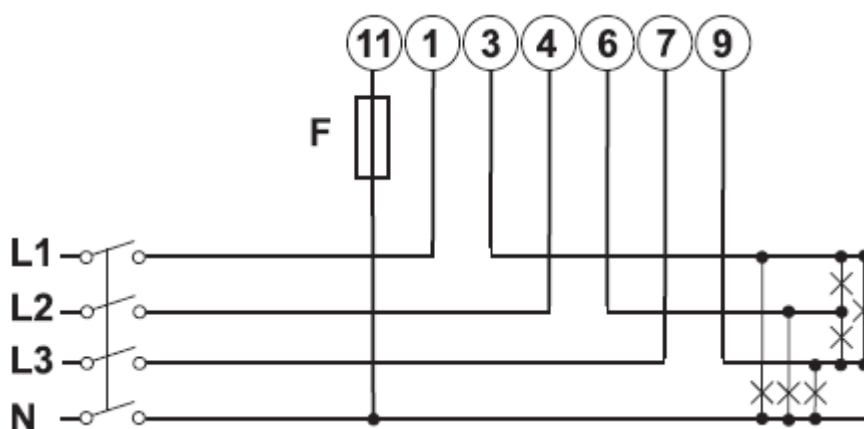
KUVA 31. CP-signaalin muoto lataushetkellä

Kuvan perusteella jännitteen suuruus on noin 6 V (eli erillistä tuuletusta ei tarvita) ja pulssin kesto-aika on 220 μ s jaksonajan ollessa 1000 μ s. Pulssisuhteeksi tällöin saadaan $\frac{220}{1000} = 0,22$. Tätä vastaava latausvirta noin 13 A taulukon 6 mukaisesti määritettynä. Kaapelin ja liittimien vastusarvoksi R_c oli tässä tapauksessa määritetty noin 2200 Ω , joka taulukon 4 mukaisesti vastaa 13 A latausvirtaa.

4.3 Latauspisteen muut komponentit

Sähköauton latauspiste on suojattava standardin SFS 6000-7-722 mukaisesti. Jokainen latauspiste on siis suojattava enintään 30 mA tyypin A vikavirtasuojalla. Mikäli monivaiheisen kuormituksen ominaisuuksia ei tarkemmin tiedetä, on suojauduttava myös tasasähkövioilta käyttämällä esimerkiksi tyypin B vikavirtasuojaa. (Sesko 2016, 2).

Latauspisteeseen valittiin tehomittariksi Phoenix Contact EEM-350-D-MCB, joka on toteutettu suoralla virranmittauksella, jota voidaan käyttää aina 65 A latausvirroille asti. Suoralla virranmittauksella ei tarvita erillisiä virtamuuntajia, mutta toisaalta suurien virtojen mittaaminen on edullisempaa virtamuuntajien avulla, kun mittarin virrankeston ei tarvitse olla mitattavan virran suuruinen. Tehomittarin yhdistäminen onnistuu helposti suoraan lataussäätimeen, jolloin myös mittaustulokset ovat saatavilla etähallinnan kautta. Modbus RTU –protokollaa hyödyntävä tehomittari yhdistetään lataussäätimen tuloihin A ja B. Tehomittarin kytkentä syöttävään verkkoon on esitettyä kuvassa 32. (Phoenix Contact 2016).



KUVA 32. Tehomittarin kytkentä (Phoenix Contact 2016, 6)

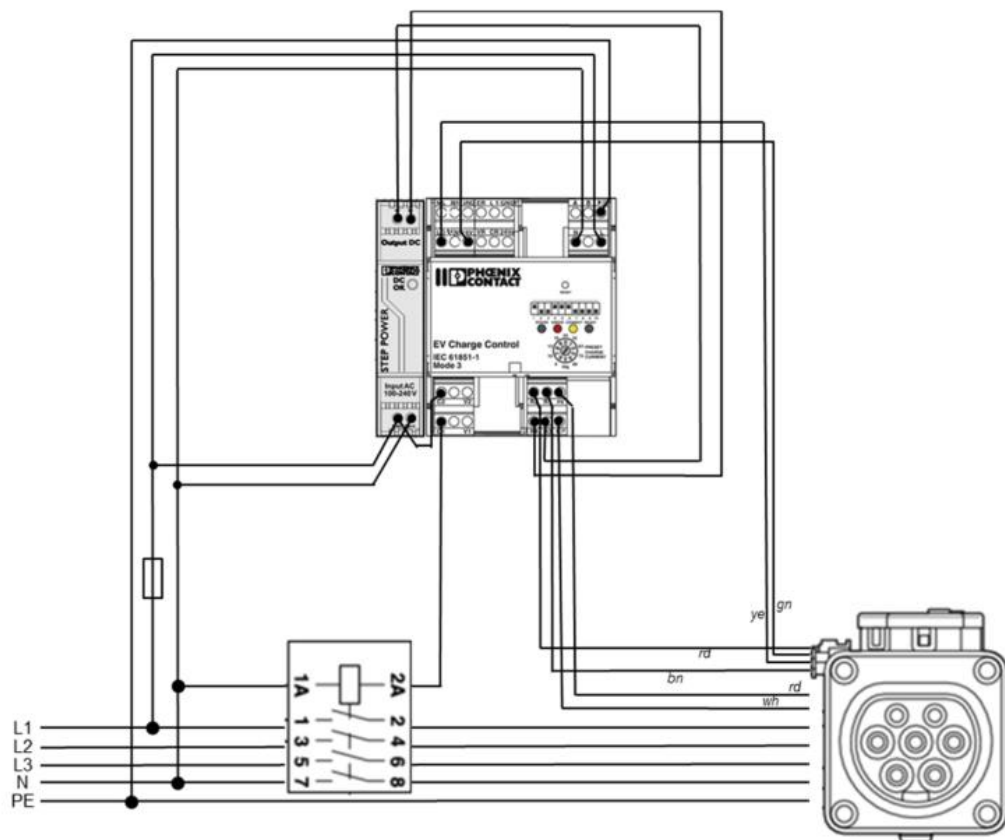
Muidenkin komponenttien valintaa tehdessä oli huomioitava pakkaskestävyys ulkoasennuksen vuoksi. Ohjauskontaktoriksi valittiin Siemens Sirius 3RT23 –kontaktori, jonka nimellisvirta on 35 A. Kontaktorin ohjaujännite on 230 V, jolloin ohjaus saadaan suoraan lataussäätimeltä. Kontaktori on myös varustettu kahdella apukoskettimella (1 NC, 1 NO), jolloin tarvittaessa kontaktorin tilasta voidaan viedä tieto lataussäätimelle. Muita latauspisteen komponentteja ovat Phoenix Contact EV-RCM-C1-AC30-DC6 –vikavirtasuojaja, Phoenix Contact STEP-PS/1AC/12DC/1 –virtalähde sekä Phoenix

Contact EV-T2M3SE12-3AC32A-0,7M6,0E12 –latausliitin. Latauspisteen komponentit asennettiin Rittalin PK9000-sarjan muovikoteloon, jonka kotelointiluokitus on IP66 eli se soveltuu hyvin ulko-olosuhteisiin.

Käytetty vikavirtasuojaja toimii niin vaihto- kuin tasavirralla. Suurin sallittu vikavirta on vaihtovirran osalta 30 mA ja tasavirralla vastaavasti 6 mA. Toiminta-ajaksi valmistaja lupaa <180 ms nimellisellä vikavirralla ja <20 ms viisinkertaisella vikavirran arvolla. Nyt käytetty vikavirtasuojaja vastaa SFS 6000 -standardissa esitettyjä vaatimuksia, kun kuormituksen tarkempia ominaisuuksia ei tiedetä. (Phoenix Contact 2017d).

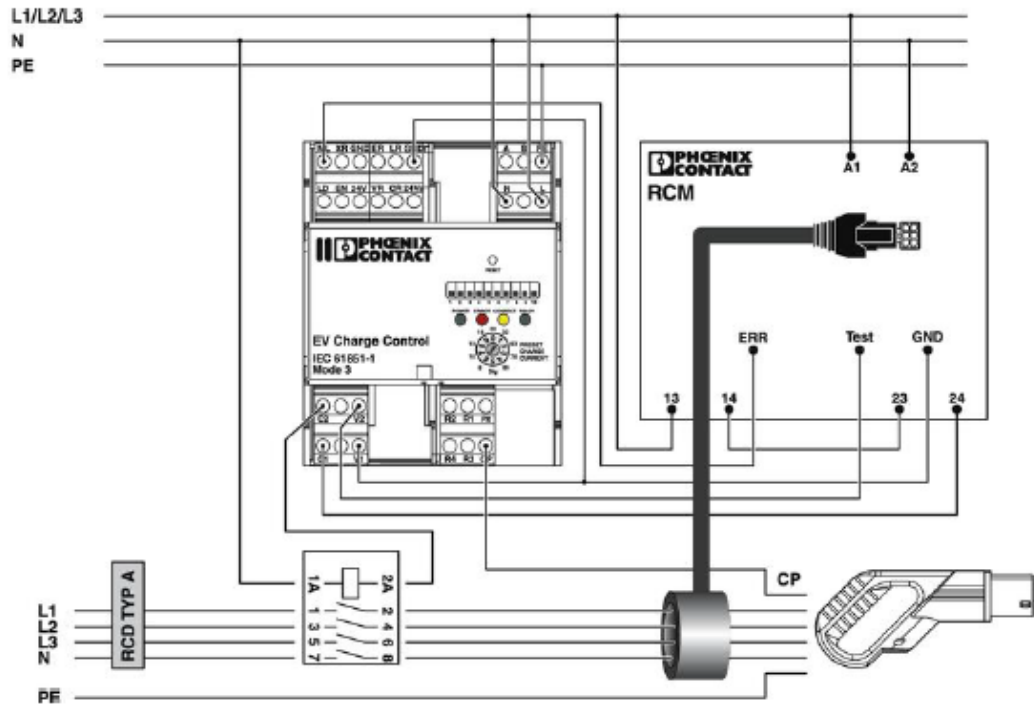
4.4 Latauspisteen kytkentäkaavion suunnittelu

Latauspisteen suunnittelun lähtökohdaksi valittiin kuvan 33 mukainen Phoenix Contactin lataussäätimen kytkentäesimerkki, jossa lataussäätimen lisäksi käytössä on erillinen 12 Vdc virtalähde ja latausliitin on lukittavissa latauksen ajaksi.



KUVA 33. Lataussäätimen kytkentäesimerkki (Phoenix Contact 2017b, 14)

Yksinkertaisimmillaan lukittavan latauspistorasian kytkentä onnistuu kuvan 33 mukaisesti, mikäli tehonmittausta ei tarvita. Tällöin syöttökaapelin vaiheet sekä nolla kulkevat ohjauskontaktorin kautta suoraan latauspistokkeelle. Vastaava kytkentäesimerkki Phoenix Contact EV-RCM –vikavirtasuojan kanssa on esitettyä kuvassa 34.



KUVA 34. Kytkentäesimerkki vikavirtasuojan kanssa kiinteällä latausliittimellä (Phoenix Contact 2017b, 24)

Latauspisteen prototyypin piirikaavio suunniteltiin hyödyntäen valmistajan tarjoamia kytkentäesimerkkejä ja piirikaavio kokonaisuudessaan löytyy liitteestä 1. Piirikaaviosta löytyvät kytkentäohjeet niin päävirtapiirin johdottamiseen kuin eri ohjaus- ja suojatoimintojen kytkentään. Piirikaaviossa on myös selvitetty kontaktorin ohjaus, mittaustiedon siirto energiamittarilta lataussäätimelle sekä latausliittimen lukitustoiminto sekä sen valvonta. Päävirtapiiri on esitettyä kuvassa 35.

5 LATAUSPISTEIDEN SJOITTAMINEN VALAISTUSVERKKOON

Tässä luvussa käsitellään ulkovalaistusverkon rakennetta ja siihen liittyvää valaistuksen ohjausta. Näiden lisäksi luvussa käydään läpi valaistusverkon tarkasteluun käytetty KeyLight-verkkotietojärjestelmä sekä kuormituslaskelmat yhden ulkovalaistuskeskuksen osalta.

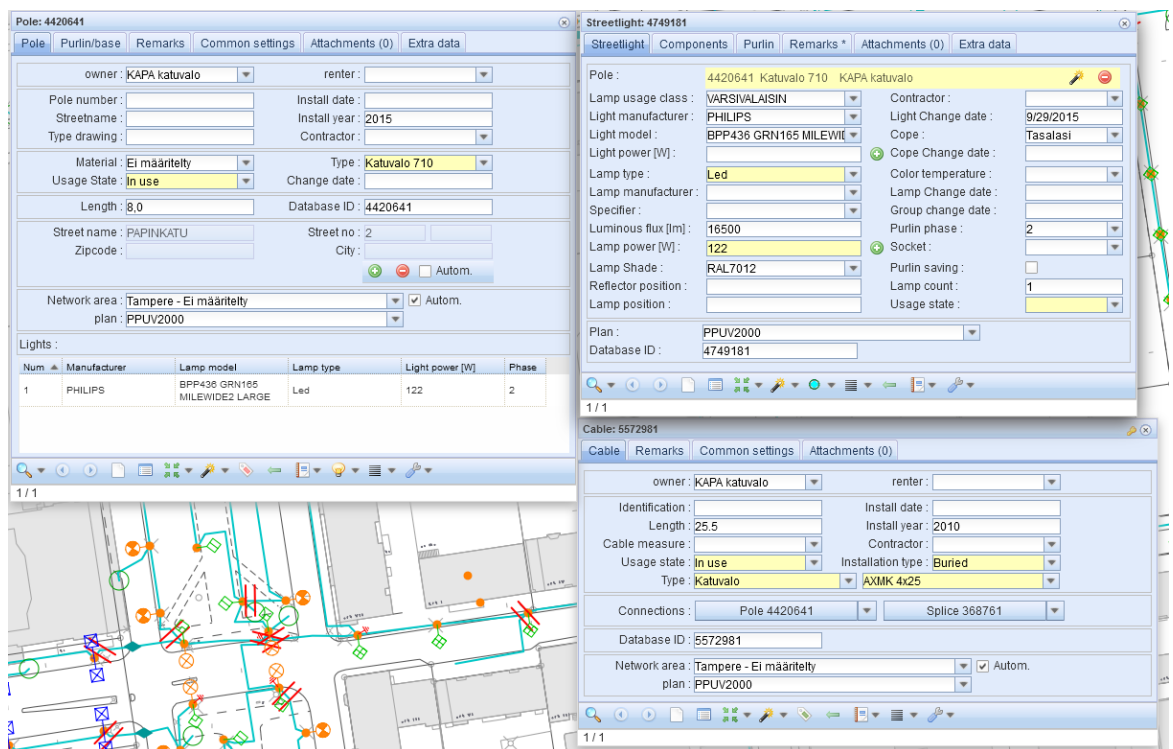
5.1 KeyLight-verkkotietojärjestelmä

Valaistusverkon tarkastelussa ja kuormitettavuuden laskennassa hyödynnettiin työssä KeyLight-ohjelmistoa, joka on Keypro Oy:n kehittämä selainpohjainen verkkotietojärjestelmä ulkovalaistusverkon hallintaan ja suunnitteluun. Kyseistä verkkotietojärjestelmää käyttävät Tampereen alueella niin Tampereen Vera ulkovalaistusverkkojen rakentamiseen ja kunnossapitoon kuin Tampereen kaupunki valaistusverkon suunnitteluun. KeyLight-verkkotietojärjestelmällä onnistuu myös vikapalautteiden, huoltotiimien työnohjauksen ja asiakkaan raportoinnin hallinta varsinaisen suunnittelun lisäksi. Ohjelman päänäkymä on esitettyä kuvassa 36, jossa kuvattuna on valaistusverkkoa Tampereen keskustan alueella. (Tampereen kaupunki 2017).



KUVA 36. KeyLight-verkkotietojärjestelmän käyttöliittymä (Tampereen kaupunki 2017)

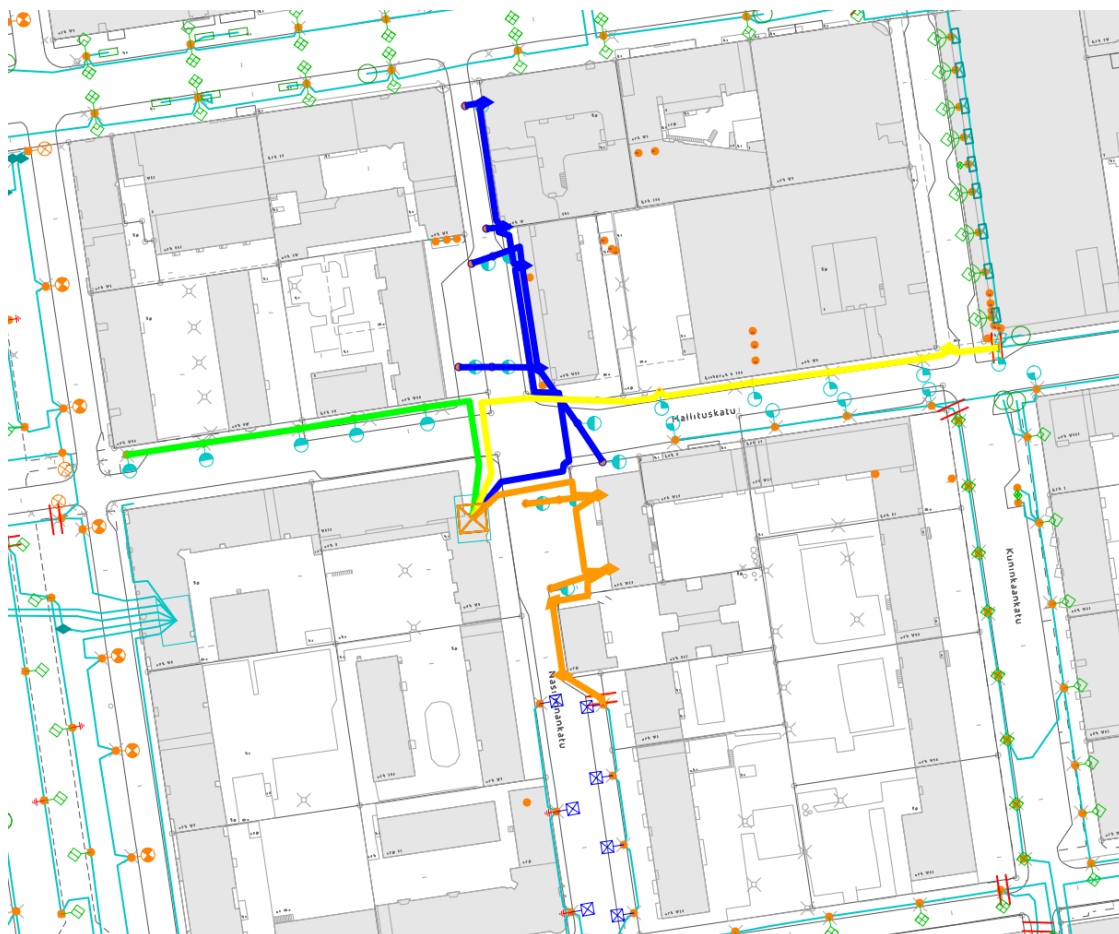
KeyLight-verkkotietojärjestelmä mahdollistaa katuvaloverkon komponenttien tarkkojen sijainti- ja ominaisuustietojen hallinnan. Kuvassa 37 on esitettyä valaisimiin, valaisinpylväisiin ja kaapelointiin liitettyjä ominaisuustietoja. KeyLight-järjestelmä mahdollistaa myös helpon tiedonjakamisen useiden eri sidosryhmien välillä hyödyntämällä käyttäjätunnuksia, joiden oikeudet on rajattu tarvittavaan tietoon. Tällöin esimerkiksi kartoitusurakoitsijoiden on helppo päivittää katuvaloverkon kartoitustietoja jo kentällä. Ohjelmistoa käytetään mobiilikäyttöliittymän välityksellä, joten erillistä asennusta ei tarvita. Järjestelmän tietyt ominaisuudet ovat vielä kehityksen alla eikä esimerkiksi valaistusverkkojen oikosulkulaskentaa voida vielä tehdä.



KUVA 37. Valaistusverkon eri komponenttien tarkempia tietoja (Tampereen kaupunki 2017)

5.2 Valaistusverkon rakenne ja soveltuvuus sähköautojen lataukseen

Ulkovalaistusverkon kuormitettavuuden tarkastelua varten Tampereen keskustan alueelta valittiin eräs valaistuskeskus, joka on sen lähtöinen esitettyä kuvassa 38.

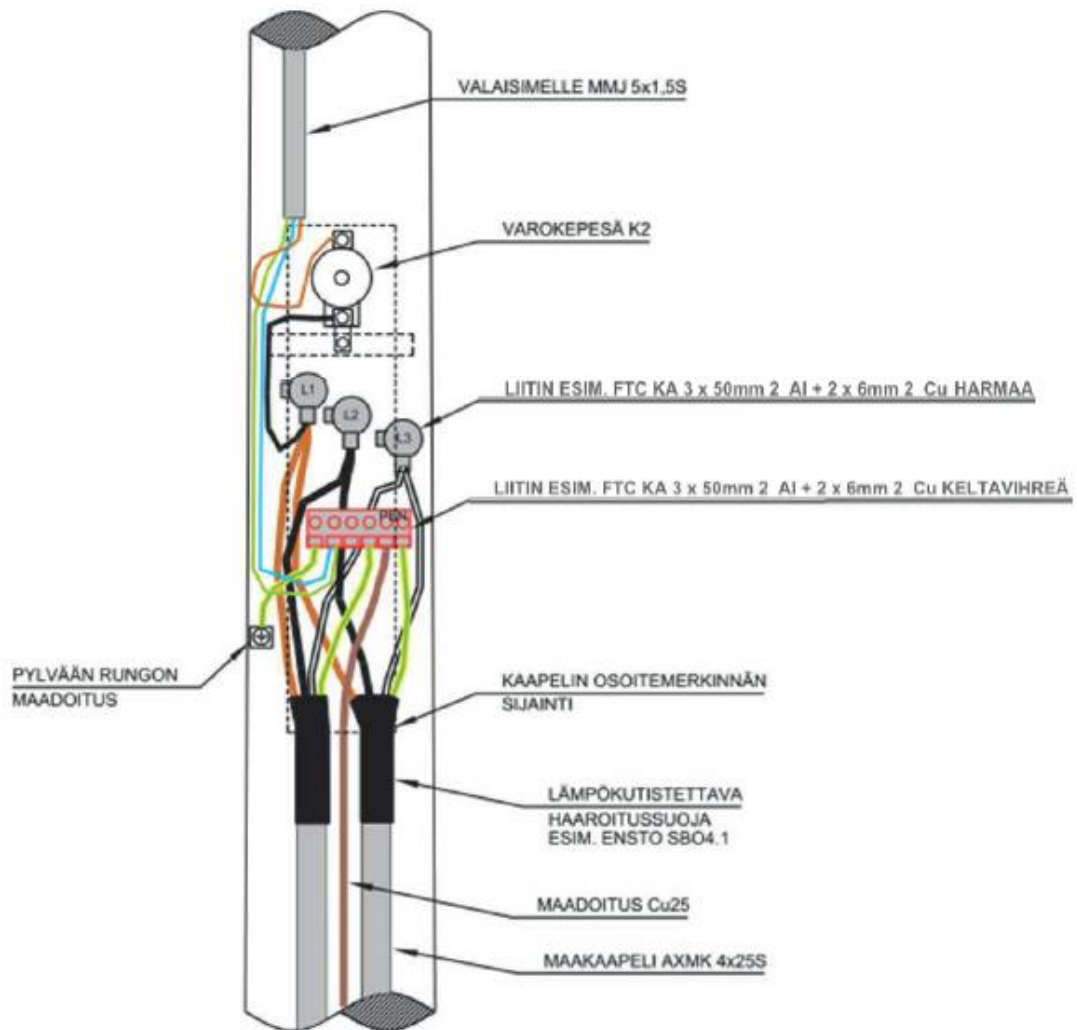


KUVA 38. Tarkasteltava ulkovalaistuskeskus KV-0229 ja sen lähdöt (Tampereen kaupunki 2017)

Valaistusverkkoon on varayhteyksiä varten rakennettu rengasrakenteita ja kunkin keskuksen lähdön valaistuskuorma on pyritty jakamaan tasaisesti eri vaiheiden kesken. Tarkemmin tarkasteltua keskusta vastaavan valaistuskeskuksen rakenne on esitettyinä liitteestä 2 löytyvästä katuvalokeskuksen pääkaaviosta. Liitteen 2 mukaisesti valaistuskeskuksen päävarokkeet ovat nimellisvirraltaan 63 A ja ryhmien lähdöissä vastaavasti on nimellisvirraltaan 25 A sulakkeet. Valaistusverkot Tampereella toteutetaan maakaapelointina ja uusissa asennuksissa käytetty kaapeli on tyyppiä AXMK-PLUS 4x25S. Ulkovalaistusverkossa on kuitenkin käytetty myös muita kaapeleita, kuten MCMK 3x10+10. (Tampereen kaupunki 2016b, 24; 2017).

Latauspiste valittiin sijoitettavaksi valaisinpylvään ulkopuoliseen koteloon, sillä pylväiden sisään rakentaminen olisi ollut hyvin haastavaa, mikäli halutaan hyödyntää kolmivaiheista latausta sekä energianmittausta. Pylväissä käytettävien liittimien, kalusteiden ja laitteiden suojausluokan on oltava vähintään IPX3, jolloin latauspisteen kaikki komponentit olisi joka tapauksessa koteloitava. Esimerkiksi lataussäätimen

kotelointiluokka on IP20. Tarkemmin valaisinylvään sisäistä kytkentää on esitetty kuvassa 39. (Tampereen kaupunki 2016b, 25)



KUVA 39. Ulkovalaistuspylvään kytkentätilan järjestely (Tampereen kaupunki 2016b, 25)

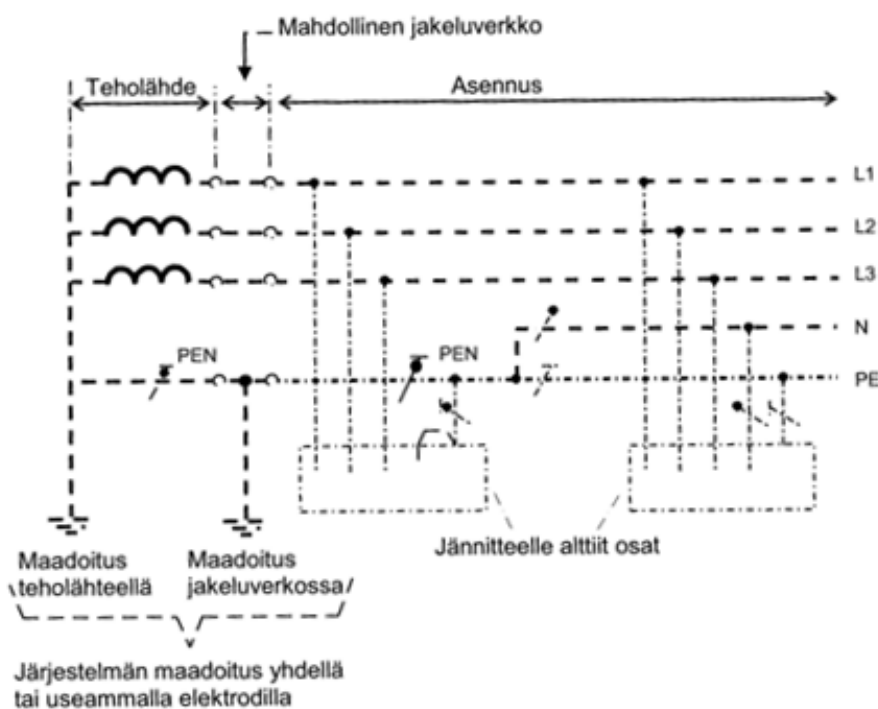
Myös pylväiden fyysinen sijainti rajoittaa latauspisteiden mahdollisia sijoituskohteita, kuten kuvasta 40 voidaan havaita.



KUVA 40. Erilaisia valaisinpylväiden sijainteja keskusta-alueella (Kuva: Henri Hirvonen 2016)

Vasemmanpuoleinen valaisinpylväs soveltuisi hyvin latauspisteen sijainniksi, mutta oikealla olevan pylvään ja ajoradan välissä on kevyen liikenteen väylä, joka poissulkee latauspisteen sijoittamisen kyseiseen pylvääseen.

Ongelmaksi valaisinpylväiden fyysisen sijainnin lisäksi muodostuu kuvassa 41 esitetty valaisinverkossa käytetty TN-C-S-järjestelmä, jossa nolla- ja suojamaadoitusjohdintoiminnot on yhdistetty yhteen PEN-johtimeen tietyllä sähköverkon osalla ja niiden erotus tapahtuu myöhemmin. Standardin SFS-6000-7-722 mukaisesti sähköautojen latauspisteiden yhteydessä olisi käytettävä TN-S-järjestelmää eli tällöin käytössä ovat erilliset nolla- ja suojajohtimet. (SFS 6000-7-722:2012, 4).



KUVA 41. TN-C-S-järjestelmän rakenne (D1-2012, 64)

Perustilanteessa verkon suojalaitteiden toiminnallisuudessa ei ole ongelmaa, mutta TN-C-S-järjestelmän ongelmaksi muodostuu PEN-johtimen mahdollinen katkeaminen, jolloin vaihejännite kytkeytyy laitteen sisäisen impedanssin sekä nolla- ja suojajohtimen eriyttämiskohdan kautta suojamaadoitetun laitteen kuoreen eli tässä tapauksessa latauspisteeseen. Järjestelmässä on kuitenkin mahdollista käyttää lisämaadoituksia, jolloin vikatilanteessakin vikavirtasuojauksen toiminta varmistettaisiin. Katuvalaistusverkossa pylväillä on myös tehtävä maadoituksia 200 m välein, jolloin maadoitettuja pylväitä olisi mahdollista hyödyntää latauspisteiden sijoittelussa. Tämä kuitenkin rajoittaisi latauspisteiden sijoittelua liikaa, sillä kuten kuvasta 40 havaittiin, läheskään kaikki valaisinylväät eivät sovellu latauspisteiden sijoituskohteiksi. (D1-2012, 275; Tampereen kaupunki 2016b, 26)

Suojajohtimen jatkuvuuden suositellaan olevan alle 1Ω (D1-2012, 338), jolloin mahdollisen lisämaadoituksen mitoittamisen kannalta oleellista on tietää vikavirran suuruus, vian kesto-aika ja maaperän sekä maadoituselektrodin ominaisuudet. Näiden tietojen avulla voidaan määrittää kokonaismaadoitusimpedanssi kunhan myös rinnakkaiset maadoitusjärjestelmät huomioidaan ja näin ollen maadoitusjännite voidaan laskea. Maadoitusjännitteen on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin kaksinkertainen

sallittu kosketusjännite, joka määräytyy vian keston perusteella. (SFS 6000-4-41:2012, 91–97).

Latauspiirejä suositellaan myös syötettäväksi keskukselta omista lähdeistään eikä lähtöihin ei suositella liitettäväksi muuta kulutusta. Valaistuskormi on kuitenkin pienenemässä LED-valaisimiin siirtymisen johdosta, jolloin tästä ei todennäköisesti aiheutuisi ongelmia sähköauton latauspisteen syötön kannalta. Tarkemmin verkon kuormitettavuutta on tarkasteltu luvussa 5.4. Toisaalta valaisimet eivät saa aiheuttaa häiriöitä syöttävään sähköverkkoon, jolloin sähköautojen latauspisteiden tuottamat yliaallot voisivat olla ongelmallisia. (SFS 6000-7-722:2012, 4; Tampereen kaupunki 2016b, 26–27).

5.3 Valaistuksen ohjaus

Valaistuksen ohjaus voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla. Ohjausjärjestelmiä ovat esimerkiksi paikallishojaus, ketjuttaminen, keskitetty ohjaus tai valaisinkohtainen ohjaus. Paikallishojauksessa käytetään pienillä alueilla, joissa etäisyydet toisiin valaistuskeskuksiin ovat suuret ja niissä käytössä yleensä on hämäräkytkin tai kello. Ketjuttamisessa useat valaistuskeskukset ovat yhdistettyinä toisiinsa kaapelilla, jolloin yhden valaistuskeskuksen ohjauskäskyt välittyvät laajemmalle alueella. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu vika-alueen laajeneminen vikatilanteissa. Keskitetyssä ohjauksessa tieto välitetään yhtäaikaaisesti yhtenäiseen valaistusverkon osaan, jolloin vältytään eriaikaisilta syttymis- ja sammumisajankohdilta. Valaisinkohtaisessa ohjauksessa ohjaustieto välitetään korkeataajuisena signaalina ryhmäjohtaja pitkin suoraan valaisimille. Valaisinkohtainen ohjaus on mahdollista toteuttaa myös langattomana ohjauksena. (Liikennevirasto 2015, 104).

Kuvassa 42 on esitettyä osa liitteestä 2 löytyvästä ulkovalaistuskeskuksen pääkaaviosta. Kuvan 42 mukaisessa ohjaustavassa valaisinpylväät ovat jännitteettöminä, kun valaistus on kytkettyä pois päältä. Tällöin latauspisteen käyttö esimerkiksi päiväsaikaan ei olisi mahdollista.

TAULUKKO 7. Valaistusverkon kaapelien kuormitettavuudet (SFS 6000-5-52:2012, 245)

Kaapeli	Kuormitettavuus	Kuormitettavuus korjauskertoimet huomioituna
AXMK 4x25	100 A	80 A
AMCMK 3x16+10	78 A	62 A
MCMK 3x10+10	77 A	61 A
MCMK 3x6+6	57 A	45 A

Maakaapeliasennuksessa käytettävään kaapelinsuojaputkeen TEL-75 saa asentaa korkeintaan kaksi AXMK 4x25 –kaapelia, jolloin asennustavasta johtuva korjauskerroin $C_1 = 0,80$. Maan lämpötilasta johtuva korjauskerroin $C_2 = 1,00$, kun sen oletetaan olevan $+15^\circ\text{C}$. 25 A sulakkeita käytettäessä kaapelin kuormitettavuuden pitää olla vähintään 28 A. Tämä toteutuu kaikilla valaistusverkossa käytettävillä kaapeleilla. (SFS 6000-5-52:2012, 258).

Tyypillisesti kuormitusasteet valaistusverkossa Tampereen alueella ovat suurimmillaankin 50 %, joka vastaa noin 12 A kuormitusvirtaa. Tällöin latauspisteen virta voitaisiin rajoittaa 13 ampeeriin (mikäli latauspisteitä sijoitetaan vain yksi lähtöä kohden), jolloin valaistuskeskuksen kunkin lähdön kokonaisvirta pysyisi suojauksen nimellisvirtaa pienempänä. Taulukossa 8 on esitetty tarkasteltavan valaistuskeskuksen KV-0229 valaistuskuormat eri lähdöissä. Kuormien tarkastelussa apuna on käytetty KeyLight-verkkotietojärjestelmää.

TAULUKKO 8. Valaistuskeskuksen KV-0229 lähtöjen valaistuskuormat (Tampereen kaupunki 2017)

	Kaapelointi	Pituus (pisin haara)	Valaistuskuorma
Lähtö 1	MCMK 3x10+10	152,5 m	2000 W
Lähtö 2	MCMK 3x10+10, MCMK 3x6+6, AXMK 4x25	171,4 m	750 W
Lähtö 3	MCMK 3x10+10	133,6 m	1250 W
Lähtö 4	MCMK 3x10+10, AMCMK 3x16+10	186,3 m	625 W

Kun oletetaan, että kuormitus on jaettu tasaisesti kaikkien kolmen vaiheen kesken ja että valaisinkohtainen loistehon kompensointi on käytössä ($\cos \varphi \geq 0,90$), saadaan tarkasteltavan keskuksen alueella suurimmaksi kuormitusvirraksi noin 3 A. Kyseisen keskuksen syötettäväksi voi kuitenkin mahdollisesti tulla muiden valaisinkeskusten kuormaa, mikäli varayhteyksiä otetaan vikaantumisen tai huoltotöiden takia käyttöön, jolloin laskennassa tämä olisi myös huomioitava. Kunkin valaistuskeskuksen lähdön impedanssi määritettiin Energiategollisuuden verkostosuosituksen SA 2:08 liitteestä löytyvää SA 2:2013-laskentataulukkoa hyödyntäen. Tällöin esimerkiksi lähdön 1 impedanssiksi saadaan kaavan 10 mukaisesti

$$Z = l \cdot Z_j = 0,1525 \text{ km} \cdot 3,95 \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,6023 \dots \Omega \approx 0,602 \Omega \quad (10)$$

Taulukossa 9 on vielä laskettuna kunkin lähdön kaapelien impedanssit. (Liikennevirasto 2015, 109; Tampereen kaupunki 2016b, Liite 1; Energiategollisuus 2008, Liite SA 2:2013).

TAULUKKO 9. Lähtöjen kaapeloinnin impedanssit (Energiategollisuus 2008, Liite SA 2:2013)

	Kaapelointi	Pituus l (m)	Impedanssi Z (Ω)
Lähtö 1	MCMK 3x10+10	152,5	0,602
Lähtö 2	MCMK 3x10+10	96,6	0,382
	MCMK 3x6+6	21,2	0,141
	AXMK 4x25	15	0,039
Lähtö 3	MCMK 3x10+10	133,6	0,528
Lähtö 4	MCMK 3x10+10	171,9	0,679
	AMCMK 3x16+10	14,4	0,059

Pienin vaadittu oikosulkuvirta käytettäessä B25 johdonsuojakatkaisijaa on 125 A. Oikosulkuvirta kunkin lähdön kaukaisimmassa pisteessä voidaan määrittää kaavan 11 avulla (D1-2012, 95).

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (Z_v + Z)} \quad (11)$$

jossa c on kerroin, joka huomioi jännitteenaleneman liittimissä ja johdoissa ($c = 0,95$), U on pääjännite, I_k vaadittu oikosulkuvirta, jolla suojaus toimii vaaditussa ajassa, Z_v syöttävän verkon impedanssi ja Z johtimien impedanssi. Laskennassa verkon osaimpedanssit summataan yhteen, jolloin saatu laskennallinen oikosulkuvirran arvo todellista arvoa pienempi (D1-2012, 95). Tällöin saadaan esimerkiksi lähdön 1 oikosulkuvirraksi saadaan, kun syöttävän verkon impedanssi oletetaan pieneksi ($Z_v \approx 0 \Omega$).

$$I_k = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,602 \Omega} = 364,44 \text{ A} \approx 364 \text{ A}$$

Laskennassa ei ole huomioitu syöttävän verkon impedanssia. Vastaavasti latauspisteen kytkentäkaapelin (H07RN-F 4x6mm², $R = 3,3 \Omega/\text{km}$) pituus on niin lyhyt, jolloin sen impedanssi jää merkityksettömän pieneksi (Nexans 2006, 5). Mikäli valaistusverkkoa syötettäisiin esimerkiksi 50 kVA muuntajalla ($Z_v = 0,113 \Omega$) ja liitäntäkaapelin pituus olisi 10 m ($R = 0,033 \Omega$), saataisiin oikosulkuvirraksi tällöin

$$I_k = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0,602 + 0,113 + 0,033)\Omega} = 293,30 \dots \text{ A} \approx 293 \text{ A}$$

Latauspisteiden lisäys ei siis aiheuta ongelmia valaistusverkon oikosulkusuojauksen toiminnan kannalta, mikäli kuormitusvirta pysyy alle sulakkeen nimellisvirran arvossa. Muiden lähtöjen suurimmat sallitut johtopituudet ovat esitettyinä taulukossa 10 ja ne on laskettu kaavan 11 mukaisesti. (Energiateollisuus 2008, Liite SA 2:2013).

TAULUKKO 10. Lähtöjen oikosulkuvirrat

	Oikosulkuvirrat (50 kVA muuntaja ja 10 m liitäntäkaapeli)
Lähtö 1	293 A
Lähtö 2	309 A
Lähtö 3	326 A
Lähtö 4	248 A

Mikäli latauspisteen nimellisvirta mitoitetaan siten, että verkon kuormitusasteeksi tulisi 100 % eli kuormitusvirta olisi 25 A ja tehokertoimen $\cos\varphi$ oletetaan olevan $\geq 0,90$.

Kuormitustehot olisivat tällöin $P = 15,6 \text{ kW}$, $Q = 7,6 \text{ kvar}$ ja $S = 17,4 \text{ kVA}$, jolloin jännitteenalenema voidaan laskea kaavan 12 mukaisesti. (Lehtonen 2017).

$$\begin{aligned}
 U_h &\approx I_p \cdot R + I_q \cdot X & (12) \\
 U_h &= I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \\
 U_h &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \\
 U_h &= \left(\frac{R \cdot P}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} + \frac{X \cdot Q}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \right) \\
 U_h &= \left(\frac{R \cdot P}{690 \text{ V}} + \frac{X \cdot Q}{690 \text{ V}} \right),
 \end{aligned}$$

jossa R ja X ovat tarkasteltavan kaapelin resistanssi ja reaktanssi. Vastaavasti P ja Q ovat kuormituksen pätö- ja loisteho, jolloin jännitteenalenema voidaan laskea likiarvoisesti. Suhteellinen jännitteenalenema vastaavasti saadaan laskettua kaavan 13 mukaisesti

$$\Delta U_h = \left(\frac{R \cdot P}{690 \text{ V}} + \frac{X \cdot Q}{690 \text{ V}} \right) \cdot \frac{100 \%}{230 \text{ V}} \quad (13)$$

Tällöin lähdön 1 suhteelliseksi jännitteenalenemaksi kaavaa 13 hyödyntäen saadaan

$$\begin{aligned}
 \Delta U_h &= \left(\frac{0,301 \Omega \cdot 15,6 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} + \frac{0,017 \Omega \cdot 7,6 \text{ kvar}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \right) \cdot \frac{100 \%}{230 \text{ V}} \\
 &= 3,0402 \dots \% \approx 3,0 \%
 \end{aligned}$$

Muiden lähtöjen osalta tulokset jännitteenalenemasta löytyvät taulukosta 11. Jännitteenaleneman laskennassa on hyödynnetty Energiategollisuuden verkostosuosituksen SA 2:08 liitteen SA 2:2013 laskentataulukkoa. (Energiategollisuus 2008, Liite SA 2:2013).

TAULUKKO 11. Jännitteenalenemat (Energiateollisuus 2008, Liite SA 2:2013)

	Jännitteenalenema ΔU_h
Lähtö 1	3,0 %
Lähtö 2	2,8 %
Lähtö 3	2,7 %
Lähtö 4	3,7 %

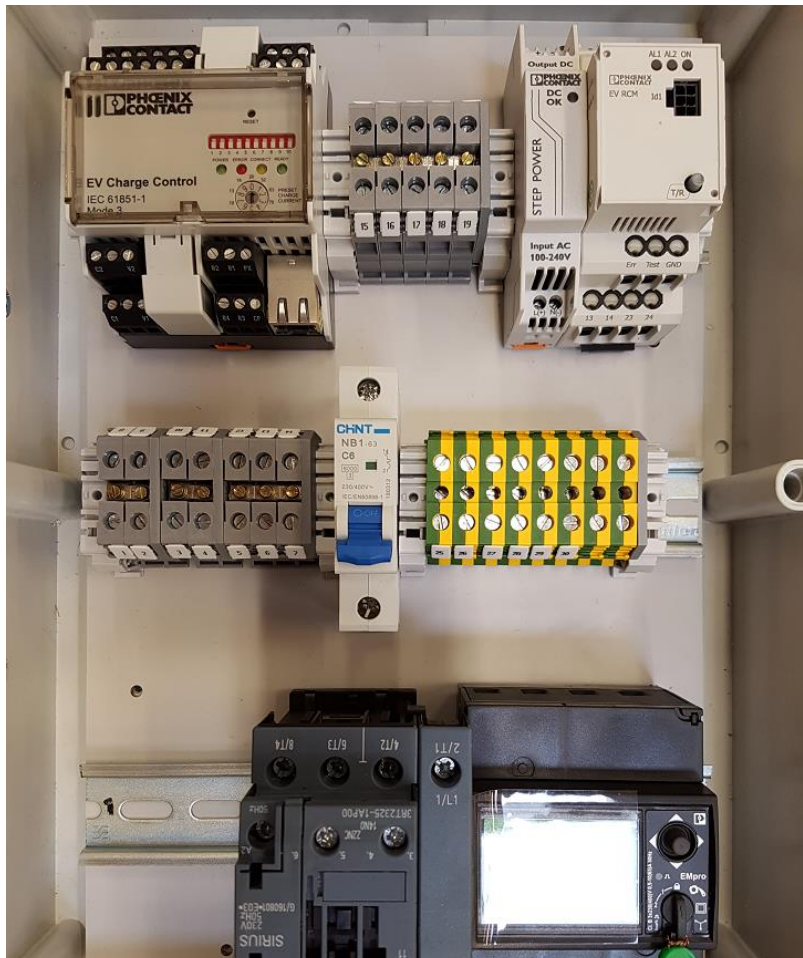
Jännitteenalenemien laskennassa on tehty oletus, että latauspiste sijoitettaisiin kaukaisimpaan pisteen kussakin lähdössä. Vaatimukset jännitteenaleneman suhteen on esitetty standardin SFS-6000 liitteessä 52G (SFS 6000-5-52:2012, 262). Valaistukselle sallittu suurin jännitteenalenema on 3 %, kun asennusta syötetään yleisestä jakeluverkosta. Muun käytön osalta sallittu jännitteenalenema on 5 %. Kahden lähdön osalta jännitteenalenema olisi suurempi kuin sallittu 3 %, joten latauspistettä syöttävä kaapeli olisi vaihdettava tai latauspisteen nimellisvirtaa olisi rajoitettava kyseisessä lähdössä.

6 LATAUSPROTOTYYPIN RAKENTAMINEN

Tässä luvussa käsitellään latauspisteen prototyypin rakentamisvaihetta. Luvussa käydään läpi niin latauspisteen prototyypin rakentaminen kuin valmiin prototyypin kytkeminen valittuun testikohteeseen. Lisäksi käydään läpi latauspisteen käyttöönottoon liittyvät tarkastukset ja eri testivaiheet.

6.1 Rakennusvaihe

Piirikaavion suunnittelun jälkeen tarvittavat komponentit tilattiin latauspistettä varten ja komponenttien sijoittelusta koteloon tehtiin layout-kuva. Alkuperäisen layout-kuvan mukaisessa suunnitelmassa ei pysytty vaan todettiin järkevämmäksi sijoitella komponentit kuvassa 43 esitetyllä tavalla koteloon.



KUVA 43. Latauspisteen komponenttien asettelua koteloon (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Kytkenässä syöttävästä verkosta latauspistokytkimelle käytettiin MKEM 6 - asennuskaapelia ja muissa ohjauskytkennöissä käytettiin ML 1.5 tai ML 2.5 johtimia. Kuvassa 44 on esitettyä valaisinpylväs, johon latauspiste asennettiin. Lataussäädin asennettiin Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen testikentälle.



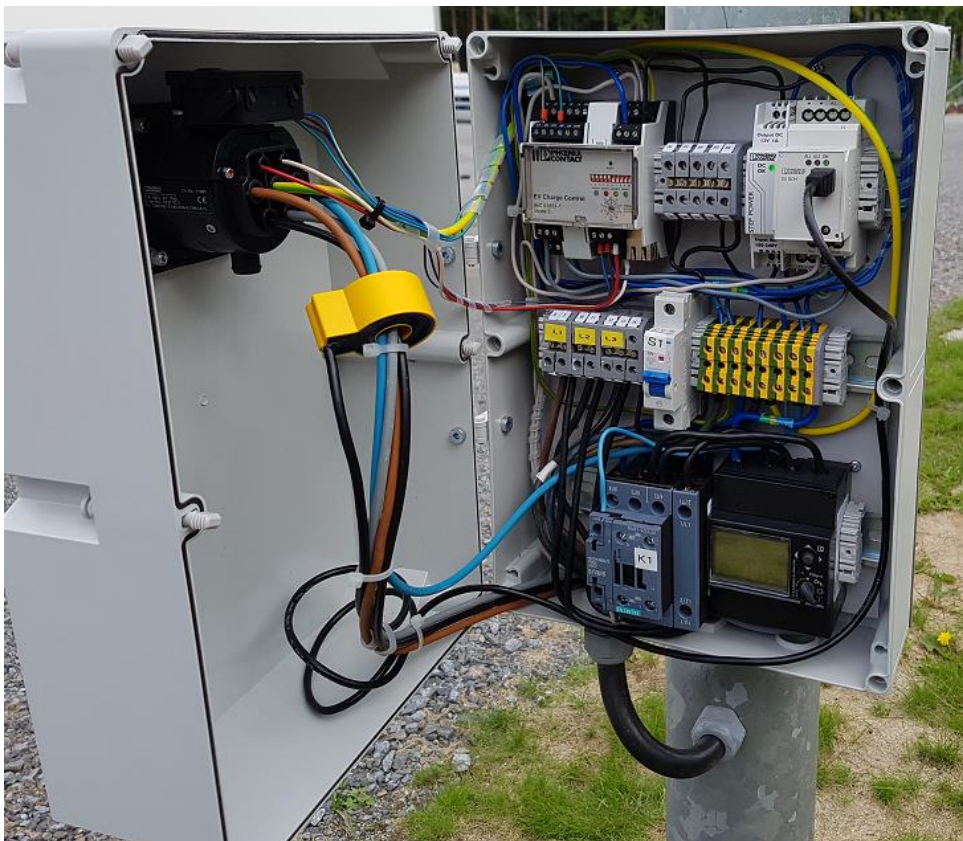
KUVA 44. Valaisinpylväs, johon latauspiste kiinnitetään (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Syöttökaapeliksi valittiin H07RN-F 4x6 mm², jonka kuormitettavuus vapaasti ilmaan asennettuna on 39 A, kun kolme johdinta on kuormitettuina (SFS 6000-5-52, 251). Kaapelin asennuksessa on huomioitava myös, ettei se ole alttiina mekaaniselle vahingoittumiselle ja se on tarvittaessa suojattava mekaanisesti. Valaistusverkossa käytettyjen B25-johdonsuojakatkaisijoiden vaadittu johdon kuormitettavuus on oltava vähintään 28 A. Latauspisteen kotelo kiinnitettiin erillisen taustalevyn avulla valaisinpylvääseen. Kotelon kiinnitys valaisinpylvääseen on esitetty kuvassa 45.



KUVA 45. Kotelon kiinnittäminen valaisinpylvääseen (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Kuvassa 46 on vastaavasti esitetty valmis latauspisteen prototyyppi, jossa kaikki komponentit ovat sijoitettuina koteloon ja latauspiste on käyttövalmiina. Kuvassa näkyy lisäksi valaisinpylvääseen syöttökaapelia varten tehty läpivienti.



KUVA 46. Käyttövalmis sähköauton latauspiste (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Kuvassa 47 on esitettyä valmis latauspisteen prototyyppi ja siinä käytetty Rittal PK9000-sarjan kytkentäkotelo kokonaisuudessaan. Latausliitin sisältää myös erillisen suojaläpän, joka parantaa latauspisteen IP-luokitusta silloin, kun latauspisteeseen ei ole kytkettyä mitään.



KUVA 47. Valmis latauspisteen prototyyppi Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen testikentällä (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

6.2 Käyttöönottotarkastus

Latauspisteelle suoritettiin myös standardin SFS 6000 mukainen käyttöönottotarkastus, jossa tarkastetaan laitteiston määräysten mukaisuus ja turvallisuus. Käyttöönottotarkastukseen sisältyy aistinvaraisten tarkastusten lisäksi myös mittauksia ja toiminnallisia kokeita. Aistinvaraista tarkastusta tehdään koko asennustyön ajan ja mittaukset täydentävät sitä. Mittaukset on myös suoritettava vasta siinä vaiheessa, kun asennuksen myöhemmät vaiheet eivät vaikuta tulokseen. (D1-2012, 318–325).

Jännitteettöminä tehtäviä mittauksia ovat suojajohtimien jatkuvuuden testaus sekä eristysresistanssin mittaus. Jännitteettömänä vastaavasti testataan syötön automaattisen poiskytkennän toiminta, johon sisältyy myös vikavirtasuojien toiminnallisuuden testaus.

Käyttöönottotarkastuksen yhteydessä on myös mahdollista mitata maadoituselektrodin resistanssi, jota ei yleensä TN-järjestelmässä ole tarpeellista tehdä. Elektrodin resistanssin mittaaminen olisi kuitenkin järkevää tehdä siinä tapauksessa, kun latauspisteen yhteyteen rakennettaisiin lisämaadoitusta verkon rakenteen vuoksi. (D1-2012, 325–333).

Aistinvaraisessa tarkastuksessa ei havaittu puutteita latauspisteen osalta. Käyttöönottotarkastukseen liittyvät mittaukset suoritettiin kuvan 48 mukaisella Profitest MTech –käyttöönottotesterillä.



KUVA 48. Profitest Mtech -käyttöönottotesteri (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Käyttöönottotarkastukseen liittyvät mittaustulokset on esitetty taulukossa 12.

TAULUKKO 12. Käyttöönottotarkastuksen tulokset

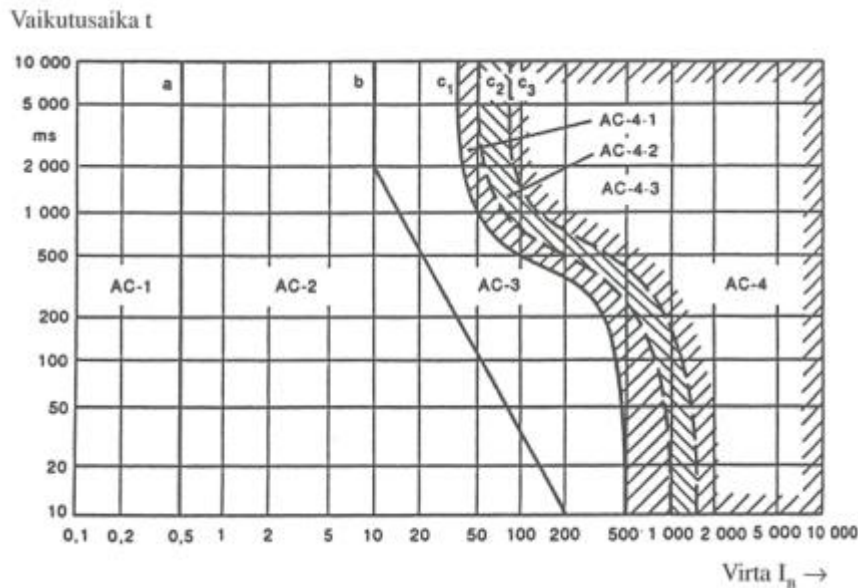
Mittaus	Mittaustulos
Suojajohtimen jatkuvuus	0,22 Ω
Eristysresistanssi	1,47 M Ω
Silmukkaimpedanssi Z_k	0,36 Ω
Laskettu oikosulkuvirta I_k	734 A

Suojajohtimen jatkuvuuden resistanssiarvon suositellaan yleensä olevan alle 1Ω ja eristysresistanssin on oltava vähintään $1,0 \text{ M}\Omega$ mikäli käytetty koejännite on ollut 500 V . Laskettu oikosulkuvirta on myös täysin riittävän latauspistettä syöttävän verkon suojausten oikean toiminnan kannalta. Vaatimus vikavirtasuojan toiminta-ajasta on esitetty standardissa SFS 6000. Vikavirtasuojan toimintaa testattaessa, saatiin taulukon 13 mukaiset mittaustulokset (SFS 6000-5-53, 296; SFS 6000-6-61, 355).

TAULUKKO 13. Vikavirtasuojan testaus

Mittausvirta $I_{\Delta n}$	Toiminta-aika t	Vaadittu aika t_{max}	Toimintavirta $I_{\Delta n}$
30 mA	118,4 ms	300 ms	27 mA
150 mA	27,8 ms	40 ms	-

Vikavirtasuojan toiminta oli vielä nopeampaa ($t = 14,4 \text{ ms}$), mikäli testaus suoritettiin pulssimaista tasavirtaa sisältävällä vikavirralla. Toiminta-ajat ovat vaatimusten mukaiset, mutta varsinaisella vikavirtasuojakytkimellä etenkin pienellä virralla laukaisuun kuluva aika saataisiin merkittävästi pienemmäksi. Vikavirran vaarallisuus voidaan määrittellä kuvan 49 mukaisesti



KUVA 49. Vikavirran vaikutusalueet (D1-2012, 50)

Nyt käyttöönottotarkastuksen yhteydessä mitatut laukaisuajat jäävät alueelle AC-2, jossa ei tavallisesti havaita haitallisia fysiologisia vaikutuksia. Alueella AC-3 vastaavasti

havaitaan palautuvia sydämen toimintahäiriöitä, lihaskouristuksia ja hengitysvaikeuksia, jotka pahenevat virran kestoajan kasvaessa. (D1-2012, 50).

6.3 Latauspisteen toiminnan testaus

Latauspisteen testauksen ajan taulukon 3 mukaisista dippikytkimistä päällä olivat kytkimet 1, 2, 4 ja 5. Tällöin käytössä olivat käytetyn kaapelin kuormitettavuuden tarkastelu sekä latauspistokytkimen lukitus latauksen ajaksi. Latauspisteen toiminnallisuuden testauksessa käytetty mittalaite oli JTM Power Products EVSE Charging Point Tester, joka on esitettyä kuvassa 50.



KUVA 50. Latauspisteen testilaite (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

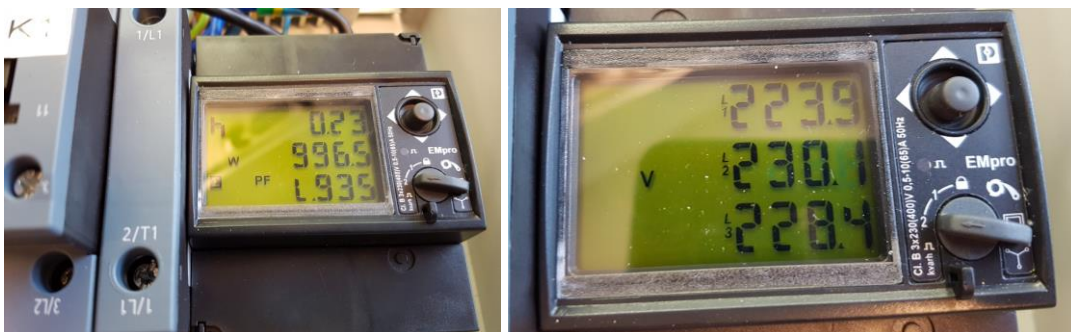
Vikavirtasuojan testaus on myös mahdollista suorittaa kyseisen testilaitteen avulla, sillä testilaitteesta löytyy erillinen kotitalouspistorasia. Testilaitteesta voitiin valita mistä vaiheesta pistorasiaa syötetään. Testerin kanssa oli helppo todeta lataustapahtuman käynnistyminen sekä latausliittimen lukituksen toiminta. Testilaitteen avulla pystytään mallintamaan sähköauton lataustapahtuman B, C ja D vaiheita taulukon 5 mukaisesti. Testilaitteessa oli myös merkkivalot ilmaisemassa kunkin vaiheen jännitteisyyttä. Testilaitteen tarjoamaan latauspisteen toiminnallisuuden testaukseen käytettiin myös latauspisteeseen kytkettäviä sopivia vastusarvoja eri ohjaussignaaleihin liitettynä. Kuvassa 51 on esitettyä testauksessa hyödynnetty dekadivastus.



KUVA 51. Testausvaiheessa käytetty dekadivastus (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

Dekadivastuksien avulla voitiin mallintaa niin kaapelin ja sen liittimen impedanssia kuin sähköauton sisäisiä lataustapahtuman käynnistäviä vastusarvoja. PX-signaalin mittaama resistanssi määrittelee latauskaapelille sallitun latausvirran ja kahden eri vastuksen avulla saadaan lataustapahtuma käynnistymään kuvan 29 mukaisesti. Havaittu lataussekvenssi seurasi taulukossa 5 mainittuja vaiheita, jossa kytkemällä vastuksen R_2 rinnalle toinen vastus R_3 lataus saatiin käynnistymään. Pistokytkimen lukitus onnistui myös, kun vastus R_2 kytkettiin kiinni järjestelmään. Ongelmaksi kuitenkin muodostui lukituksen avaaminen, joka tapahtui vasta kun vastus R_2 kytkettiin irti latauspisteestä. Todellisuudessa lukitus avattaisiin lataustapahtuman loppuksi automaattisesti auton ja latauspisteen välisen kommunikaation välityksellä.

Latauspisteen testauksen yhteydessä tarkistettiin myös energiamittarin toiminta. Kuvassa 52 on esitetty energiamittarin näyttö, kun mittarilta on tarkasteltu pätehoä sekä tehokerrointa ja kunkin vaiheen jännitteitä. Latauspisteen kuormitus on ollut kolmivaiheinen tasasuuntaussilta, jolloin verkosta otettiin noin 1000 W pätehoä.

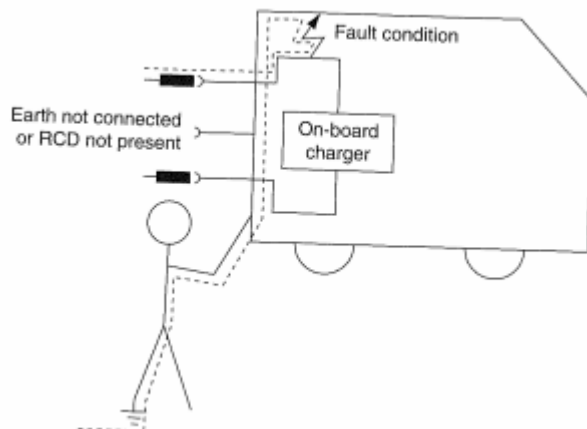


KUVA 52. Tehon mittaus ja vaihejännitteet (Kuva: Henri Hirvonen 2017)

7 YHTEENVETO JA LATAUSPISTEEN JATKOKEHITTÄMINEN

Sähköauton latauspisteen prototyyppi saatiin rakennettua onnistuneesti ja sen todettiin täyttävän sitä koskevat sähköturvallisuusvaatimukset. Vaatimusten täyttyminen todettiin tekemällä vaaditut tarkastukset ja siihen liittyvät mittaukset. Latauspisteen turvallinen käyttö on tällä hetkellä mahdollista ja se tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet sen jatkokehittämistä varten.

Sähköauton latauspisteen prototyypin rakentamisen yhteydessä havaittiin tiettyjä ongelmia latauspisteen liittämisen kanssa ulkovalaistusverkkoon. Ongelmaksi muodostuivat valaistusverkossa käytetyn TN-C-S-järjestelmän ominaisuudet etenkin vikatilanteissa. Eräs mahdollinen vikatilanne on esitetty kuvassa 53, jossa PEN-johtimen katketessa auton runko voi tulla jännitteiseksi. Standardissa SFS 6000-7-722 suositellaankin käytettäväksi TN-S-järjestelmää sähköautojen lataamisessa. Myös valaistuksen ohjaus nykyisellään ei ole soveltuva latauspisteiden käyttämiseksi ulkovalaistusverkossa, mutta tähän on tulossa muutos LED-valaistukseen siirtymisen yhteydessä.



KUVA 53. Vaaratilanne, mikäli suojamaata tai vikavirtasuojaa ei ole kytkettyä (Pistoia, 525)

Nyt latauspisteessä käytetty vikavirtasuoja toimii kontaktorin välityksellä, jolloin laukaisuaika jää melko pitkäksi pienillä vikavirroilla verrattuna varsinaiseen vikavirtasuojaan. Erillinen vikavirtasuojakytkin olisi mahdollista sijoittaa valaisinpylvään sisään, mutta kotelointiluokituksen on tällöin oltava IP65. Latauspisteen komponenttien sijoittaminen pylvään sisään on myös ongelmallista niin tilanpuutteen

kuin komponenttien puutteellisen kotelointiluokituksen suhteen. Talvisin pylväiden sisälle jäänyt kosteus sulaessaan aiheuttaa omat ongelmansa ja vaatimuksensa komponenttien kotelointiluokitukselle. Pylvään ulkopuolisen rakenteen ongelmana ovat kuitenkin vauriot tai mahdollinen ilkivalta. (Tampereen kaupunki 2016b, 22).

Sähköautojen lataamiseen liittyvä tehoelektroniikka aiheuttaa myös omat ongelmansa sähköverkon kannalta. Etenkin tyristorisiltojen ja hakkuriteholähteiden tuottamat harmoniset yliaallot lisäävät verkon rasitusta, jolloin tämä on huomioitava verkon mitoituksessa ja mahdollisessa kompensointitarpeessa. Näiden tarkastelu onnistui latauspisteen prototyypin tarjoamien ominaisuuksien avulla.

Valittu kotelo olisi voitu mitoittaa hieman nykyistä suuremmaksi, jolloin tarvittaessa uusien komponenttien asentaminen onnistuisi ja asennus olisi helpompaa toteuttaa siististi. Mikäli kotelon ulkomittoja halutaan entistä pienemmäksi, olisi osa latauspisteen komponenteista mahdollisesti siirrettävissä ulkovalaistuskeskuksen sisälle. Etenkin jos latauspisteille järjestetään oma syöttökaapeli keskukselta asti, on tällöin energian mittaus ja suojalaitteet mahdollista siirtää kokonaan keskuksen sisään.

Lisäksi latauspiste sisältää myös monipuoliset mahdollisuudet sen etähallintaan sekä mittautietojen siirtämiseen, mutta näitä ei vielä ole otettu käyttöön. Lataustehojen seuranta mahdollistaa myös latausvirtojen rajoittamisen, mikäli verkko on liian suurella kuormituksella tietyinä ajanhetkenä. Tieto lataukseen kuluneesta energiasta olisi tärkeää saada siirrettyä eteenpäin, mikäli latauspiste ei tule ilmaiskäyttöön. Käyttäjän kannalta laskuttaminen voidaan toteuttaa monilla eri tavoilla. Laskutuksessa voidaan hyödyntää perinteisiä maksukortteja ja käteistä tai uusia puhelimien kautta toimivia tai erillisellä RFID-tunnistukseen perustuvia laskutusmenetelmiä. (Pistoia 2010, 530–533).

Latauspisteeseen olisi vielä mahdollista liittää Phoenix Contact EM-EV-CLR-12V -jännitteenvalvontayksikkö, joka antaisi latauspistekytken lukitukselle avauskäskyn, mikäli syöttävä verkko muuttuisi jännitteettömäksi. Nykyiselläänkin latausliitin voidaan irroittaa latauspisteestä manuaalisesti, mutta jännitteenvalvontayksikköä käyttämällä kotelon avaamiselta vältyttäisiin. (Phoenix Contact 2017e).

LÄHTEET

Afonso, J., Ferreira, J., Gonçalves, H. & Monteiro, V. 2012. Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Intech.

Alahäivälä, A. 2012. Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan laitos. Diplomityö.

Brusa. 2017. NLG664 - On Board Fast Charger. Luettu 7.8.2017.

http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG664.pdf

Energiateollisuus ry. 2008. Verkostosuositus SA 2:08 - Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen.

EV West. 2017. Panasonic Lithium Ion NCR18650. Luettu 6.8.2017.

<http://evwest.com/support/ncr18650.pdf>

Garcia-Valle, R. & Peças Lopes, J. 2013. Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems. New York: Springer Science+Business Media.

Ghosh, A., Rajakaruna, S. & Shahnian, F. 2015. Plug In Electric Vehicles in Smart Grids. Singapore: Springer Science+Business Media.

Hietalahti, L. 2011a. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonetyöhön. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011b. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L., Männistö, M., Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén, T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.

Ji, Y. & Wang, C. 2013. Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures. Elsevier.

Keypro. 2017. KeyLight. Luettu 4.8.2017. <https://www.keypro.fi/fi/tuotteet/keylight>

Krein, P. & Yilmaz, M. 2013. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics.

Lehtonen, J. Koulutuspäällikkö. 2017. Jännitteenaleneman laskenta likiarvoisesti. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Liikennevirasto. 2015. Liikenneviraston ohjeita: Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu.

Mennekes. 2011. Panel mounted socket Schuko. Luettu 11.8.2017.

<http://www.mennekes.co.uk/135/11012-panel-mounted-socket-schukoR.html>

Mennekes. 2013. Type 2 charging socket with or without shutter. Luettu 10.8.2017.
http://www.mennekes.de/uploads/media/Type2_with_Shutter_01.pdf

MIT Technology Review. 2013. Electric Vehicles Out in the Cold. Luettu 6.8.2017.
<https://www.technologyreview.com/s/522496/electric-vehicles-out-in-the-cold/>

Nexans. 2006. H07RN-F Data sheet. Luettu 7.8.2017.
<http://www.farnell.com/datasheets/19013.pdf>

Nissan. 2017. Nissan Leaf toimintamatka ja lataaminen. Luettu 11.8.2017.
<https://www.nissan.fi/ajoneuvot/henkiloautot/leaf/toimintamatka.html>

Phoenix Contact. 2015. EV Charge Control User manual. Luettu 6.6.2017.
<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2902802>

Phoenix Contact. 2016. Measuring instrument EEM-350-D-MCB Data sheet. Luettu 6.6.2017. <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2905849>

Phoenix Contact. 2017a. AC-latauskaapelit. Luettu 7.8.2017.
https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?ldmy&urile=wcm%3apath%3a/fifi/web/main/products/subcategory_pages/AC_Charging_cable_P-29-03-02/e0a0cc39-78e9-458f-9271-1b7cfaf59108

Phoenix Contact. 2017b. Application Guide EVCC Advanced. Luettu 6.6.2017.
<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2902802>

Phoenix Contact. 2017c. DC-latauskaapelit. Luettu 7.8.2017.
https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?ldmy&urile=wcm%3apath%3a/fifi/web/main/products/subcategory_pages/DC_Charging_cable_P-29-03-01/528f4283-28d9-4efc-ae2f-ffc8b0307be2

Phoenix Contact. 2017d. Differential current monitoring EV-RCM-C1-AC30-DC6. Luettu 6.6.2017. <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=1622450>

Phoenix Contact. 2017e. Voltage monitoring device EM-EV-CLR-12V. Luettu 11.8.2017. <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2903246>

Pistoia, G. 2010. Electric and hybrid vehicles. Amsterdam: Elsevier B.V.

Scame. 2017. Infopoint. Luettu 11.8.2017. <http://www.scame.com/br/infopoint/infopoint/2012L9BR.asp>

Schneider Electric. 2017. EVlink – Electric vehicle charging solutions. Luettu 6.7.2017.
http://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Id=7403930402&p_File_Name=COM-POWER-VE-CA3-EN+%28web%29.pdf&p_Reference=COM-POWER-VE-CA3-EN

SESKO ry. 2016. Sähköajoneuvojen latausjärjestelmät: Sähköajoneuvojen lataaminen kiinteistöjen sähköverkoissa. Luettu 29.10.2016.

http://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ ja_latausjarjestelmat/lataussuositus_2014

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2000. SFS-EN 60309-1 Teollisuuskäyttöön tarkoitetut voimapistokytkimet. Osa 1: Yleiset vaatimukset.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010. SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010. SFS-EN 61851-1 Electric vehicle conductive charging system - part 1: general requirements.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2012. SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset.

Sähköinen liikenne. 2017. Suomen julkiset latauspisteet. Luettu 8.8.2017.

<http://sahkoinenliikenne.fi/suomen-julkiset-latauspisteet>

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2012. D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo: Sähköinfo Oy.

Tampereen kaupunki. 2010. Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategia 2030.

http://www.tampere.fi/liitteet/t/6K4C0C1Ea/Ilmastostrategia_24.3.2010_SH_hyvaksyma.pdf

Tampereen kaupunki. 2016a. Sähköisen liikenteen ratkaisut. Luettu 11.8.2017.

<http://www.tampere.fi/tampereen-kaupunki/projektit/sahkoisen-liikenteen-ratkaisut.html>

Tampereen kaupunki. 2016b. Valaistuksen yleiset laatuvaatimukset.

Tampereen kaupunki. 2017. KeyLight Tampere v2.6.

Tesla. 2017. Tesla Model S. Luettu 11.8.2017. https://www.tesla.com/fi_FI/models

Trafi. 2017a. Liikenteessä olevat hybridautot. Luettu 9.8.2017.

https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/hybridikayttoiset_henkiloautot

Trafi. 2017b. Liikenteessä olevat sähköautot. Luettu 9.8.2017.

https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot

Toyota Auto Finland Oy. 2017. Toyota Prius Plug-in. Luettu 11.8.2017.

https://www.toyota.fi/download/cms/fifi/Toyota_Prius_Plugin_autoesite_tcm-3018-991916.pdf

