

Riikka Hirvelä

SÄHKÖAUTON LATAUKSEN MALLIN- TAMINEN OSANA KIINTEISTÖN SÄHKÖ- VERKON LASKENTAA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Riikka Hirvelä: Sähköauton latauksen mallintaminen osana kiinteistön sähköverkon laskentaa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Marraskuu 2019

Sähköautojen lukumäärän on ennustettu kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi, mikä lisää myös julkisten sekä kiinteistöjen latauspisteiden lukumäärää. Latauspisteiden liittäminen kiinteistöön tapahtuu tapauskohtaisesti. Ensin on hyvä selvittää sähköautojen lataustehon tarve ja kiinteistön sen hetkinen kuormitus. Tämän jälkeen voidaan tehdä tarkempia suunnitelmia latauspisteiden sijainnista ja tarvittavista muutoksista kiinteistön verkkoon, kuten liittymän koon kasvattaminen tai kuormanhallinnan toteuttaminen.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tarkastella OpenDSS-ohjelman soveltuvuutta sähköauton latauksen kuorman mallintamiseen. Ensimmäinen vaihe oli mallintaa työssä testiympäristönä käytetty Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikön älykkään sähköverkon (Smart Grids) laboratorion verkon malli OpenDSS-ohjelmalla. Tämä tapahtui laboratoriossa suoritettujen mittausten pohjalta.

Toinen vaihe oli laskea hypoteesit OpenDSS-ohjelmalla, kun verkkoon oli lisätty sähköauton kuorman malliksi vakiovirtakuormamalli. Tämän jälkeen kytkettiin Nissan Leaf sähköauto laboratorion verkkoon ja mitattiin jännitettä ja virtaa seitsemässä eri tapauksessa, joissa erona oli säästövastuksen asento. Lataus tapahtui yksivaiheisena latauksena lataustavan 3 mukaisesti. Mittauksen jälkeen verrattiin mitattuja ja OpenDSS-ohjelmalla saatuja tuloksia. Tässä kohtaa myös OpenDSS-ohjelman tulokset laskettiin uudestaan, kun tiedettiin tarkemmat arvot mittausten perusteella lähtötilojen jännitteille sekä latauksen aikaisille virtarajoille.

Mittaus toistettiin myös kahdelle muulle sähköautolle, Hyundai Ioniq Plug-in ja BMW i3. Näistä BMW i3 mitattiin vastaavasti kuin Nissan Leaf. Hyundai Ioniq Plug-in puolestaan ladattiin ja mitattiin lataustavan 2 mukaan. Tämän jälkeen mittausten ja OpenDSS-ohjelman tuloksia verrattiin ja tuloksien erojen syitä käsiteltiin. Erojen syiksi todettiin, mittausrvirheiden ja -tarkkuuksien lisäksi, lähtötilan jännitteen mallintaminen. Kuitenkin erot olivat vähäisiä, joten näiden tulosten pohjalta OpenDSS-ohjelman malli pätee hyvin mallintamaan yksivaiheista sähköauton latauksen aiheuttamaa kuormaa sähköverkossa.

Avainsanat: kiinteistön verkko, latauksen mallintaminen, lataustapa, OpenDSS-ohjelma, sähköauto, sähköverkko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Riikka Hirvelä: Modeling the charging of the electric car as a part of the calculation of the electric grid in real estate

Master's thesis

Tampere University

Electrical Engineering

November 2019

The number of electric cars is forecasted to grow in the future remarkably. Growth of the number of electric cars will probably increase the number of public charging stations as well as the number of charging stations in real estate. The connection of the charging station to the real estate is case specific. First, it is good to find out the charging power of the electric cars and the present total load of the real estate. After that, it is possible to make detailed plans to the placement of the charging stations and needed changes to the electric grid of the real estate, such as changes to the size of electric connection or the implementation of load management.

The purpose of this thesis was to consider the suitability of the OpenDSS-program to model the charging load of an electric car. The first stage was to model the test environment on the OpenDSS-program. The test environment of this thesis was the Smart Grids laboratory of the unit of Electrical Engineering in Tampere University (TAU). The first stage was implemented by measurements in the laboratory.

The second stage was to calculate hypotheses with the OpenDSS-program, when a constant current load model was added to the electric grid as the load model of an electric car. After that, a Nissan Leaf electric car was connected to the laboratory grid and measurements for voltage and current were done in seven cases, where the difference was the position of the adjustment resistor. The charging was implemented as single-phase charging according to the mode 3. After the measurement, the results of the OpenDSS-program and the measurements were compared. In addition, the results of the OpenDSS-program were calculated again using the measured values for the initial states of voltages and currents during charging.

The measurement was repeated also for two other electric cars, Hyundai Ioniq Plug-in and BMW i3. The BMW i3 measurement was implemented similarly to the measurement of Nissan Leaf. The measurement of Hyundai Ioniq Plug-in was implemented according to the charging mode 2. After these three measurements, the results of the OpenDSS-program and the measurements were compared and the causes of differences were considered. The cause of differences was, besides the measuring error and accuracy, the modeling of initial state of voltage. However, the differences were not big. Based on the results of these measurements, it can be stated that the charging load model of the OpenDSS-program is good in modeling the single-phase charging load of an electric car in electric grid.

Keywords: electric grid of real estate, modeling of charging, charging mode, OpenDSS-program, electric car, electric grid

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikössä. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat professori Pertti Järventausta ja tutkijatohtori Antti Rautiainen, joita haluan kiittää hyvistä kommentista ja kehitysideoista työn aikana.

Haluan kiittää myös kaikkia sähkötekniikan yksikön työntekijöitä, jotka auttoivat diplomityön aikana. OpenDSS-ohjelman käytössä auttamisesta kiitos Antti Supposelle. Kiitos myös Anna Kulmalalle, Pirkko Harsialle ja Jyrki Vuoriselle sähköautojen lainaamisesta työni tutkimukseen.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia läheisiäni saamastani tuesta diplomityön aikana.

Tampereella, 19.11.2019

Riikka Hirvelä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖAUTOT JA NIIDEN LATAUSTAVAT	3
2.1 Sähköauton määritelmä	3
2.1.1 Sähköauto (EV)	3
2.1.2 Hybridiauto (HEV)	4
2.1.3 Ladattava hybridiauto (PHEV)	5
2.2 Lataustavat	6
2.2.1 Lataustapa 1: Kevyiden sähköajoneuvojen lataaminen	6
2.2.2 Lataustapa 2: Hidas lataus	7
2.2.3 Lataustapa 3: Peruslataus	7
2.2.4 Lataustapa 4: Teholataus	7
2.2.5 Langaton lataaminen	7
2.3 Tavallisimmat latauspistokytkimet	8
2.3.1 Schuko	8
2.3.2 Mennekes	9
2.3.3 CHAdeMO ja CCS	10
2.4 Sähköautojen lukumäärän kehitys ja tulevaisuus	10
3. SÄHKÖVERKON MALLINTAMINEN	14
3.1 Verkkokomponenttien mallintaminen	14
3.1.1 Muuntaja	14
3.1.2 Johto	14
3.2 Kuormituksen mallintaminen	18
3.3 Tehonjaon laskenta	20
3.3.1 Solmupisteyhtälöt ja solmupistetyypit	20
3.3.2 Newton-Raphson menetelmä	22
3.4 Sähköauto verkon kuormituksena	23
4. KIINTEISTÖN VERKON MALLINTAMINEN	26
4.1 Verkon rakenne ja komponentit	26
4.2 Sähköauton latauksen liittäminen kiinteistön verkkoon	29
5. SÄHKÖAUTON LATAUKSEN MALLINTAMINEN OPENDSS- LASKENTASOVELLUKSESSA	32
5.1 OpenDSS-laskentasovellus	32
5.2 Mittaukset laboratorion verkon mallintamiseen	34
5.2.1 Laboratoriomittausten toteutus	35
5.2.2 Laboratoriomittausten tulokset	37
5.3 Laboratorion verkon mallintaminen OpenDSS-ohjelmassa ja mallin verifiointi mittauksella	41
5.4 Sähköauton latauksen mallintaminen	42

5.4.1 OpenDSS-malli	43
5.4.2 Verifiointi mittauksilla, Nissan Leaf	44
5.4.3 Verifiointi mittauksilla, Hyundai Ioniq Plug-in	51
5.4.4 Verifiointi mittauksilla, BMW i3	57
6. YHTEENVETO.....	63
LÄHTEET	65
LIITE A: SÄHKÖAUTOJAKAUMA SUOMESSA MAAKUNNITTAIN 06/2019 [29]...	69
LIITE B: LATAUSVERKOSTO SUOMESSA MAAKUNNITTAIN 06/2019. [29]	70
LIITE C: SÄHKÖAUTOJEN LATAUSPISTEIDEN PÄÄTÖKSENTEKO ASUNTO- OSAKEYHTIÖSSÄ [52].....	71
LIITE D: JÄNNITEMITTAUS KLO 7:30–7:55.....	72
LIITE E: JÄNNITEMITTAUS KLO 19:10–20:10	73
LIITE F: JÄNNITEMITTAUS KLO 16:20–17:20	74

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Sähköauton toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6].....	3
Kuva 2.	Rinnakkaishybridin toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6].....	4
Kuva 3.	Sarjahybridin toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6].....	5
Kuva 4.	Ladattavan sarjahybridiauton toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6].....	6
Kuva 5.	Schuko pistotulppa. [23].....	9
Kuva 6.	Mennekes-pistoke ja -vastake. [24].....	9
Kuva 7.	CHAdEMo pistoke. [24].....	10
Kuva 8.	CCS pistoke ja -vastake. [24].....	10
Kuva 9.	Suomessa liikennekäytössä olevat sähköautot ja ladattavat hybridit. Tiedot lähteestä [26].....	11
Kuva 10.	Sähköautojen ja ladattavien hybridiautojen ensirekisteröinnit. Vuoden 2019 osalta tiedot ovat tammi-kesäkuulta. Tiedot lähteestä [27].....	11
Kuva 11.	Käytetyt maahantuodut sähköautot ja ladattavat hybridit. Vuoden 2019 osalta tiedot ovat tammi-kesäkuulta. Tiedot lähteestä [28].....	12
Kuva 12.	Johdon π - sijaiskytkentä (vasemmalla) ja T-sijaiskytkentä (oikealla).	17
Kuva 13.	Esimerkki solmupisteyhtälöiden muodostumisesta. [33].....	21
Kuva 14.	Esimerkki, miten kuormitusta mallinnetaan. [42].....	25
Kuva 15.	TN-järjestelmät.....	26
Kuva 16.	Nousujohtokaavio. [49].....	28
Kuva 17.	OpenDSS:n rakenne. Muokattu lähteestä [54].	32
Kuva 18.	Tehoa siirtävä ja tehoa muuntava malli. Muokattu lähteestä [54].	33
Kuva 19.	OpenDSS:n tehonjaon ratkaisutapa. Muokattu lähteestä [54].	34
Kuva 20.	Laboratorion mallinnettava osa.	35
Kuva 21.	Jännitemittaus.....	36
Kuva 22.	Jännitemittaus klo 7:31 –7:33.....	38
Kuva 23.	OpenDSS:llä mallinnettava verkon osa.	41
Kuva 24.	Verkon malli, kun sähköauton latauksen kuorman malli on lisätty.	42
Kuva 25.	Sähköauton latauksen mittaus.	45
Kuva 26.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (Nissan Leaf)	49
Kuva 27.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (Nissan Leaf)	50
Kuva 28.	Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (Nissan Leaf)	50
Kuva 29.	Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (Nissan Leaf)	51
Kuva 30.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).	55
Kuva 31.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).	56
Kuva 32.	Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).	56
Kuva 33.	Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).....	57
Kuva 34.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (BMW i3).....	60
Kuva 35.	Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (BMW i3).....	61

Kuva 36.	<i>Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (BMW i3).....</i>	<i>61</i>
Kuva 37.	<i>Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (BMW i3).....</i>	<i>62</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCS	Combined Charging System
CHAdemo	CHArge de Move
CIS	customer information system
COM	Component Object Model
BEV	battery electric vehicle
EPRI	Electric Power Research Institute
EV	electric vehicle
HEV	hybrid electric vehicle
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
PC	power conversion
PD	power delivery
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
TAU	Tampereen yliopisto
V2G	vehicle-to-grid
V2H	vehicle-to-home
V2V	vehicle-to-vehicle
<i>A</i>	johtimen poikkipinta-ala
<i>B</i>	suskeptanssi
<i>C</i>	käyttökapasitanssi
C_k	keskinäiskapasitanssi
C_o	maakapasitanssi
$E[P_i(t)]$	pätötehon odotusarvo
Δf	taajuuspoikkeama
<i>G</i>	konduktanssi
<i>I</i>	virta
I_G	vuotovirta
<i>L</i>	johdon induktanssi
<i>l</i>	johtimen pituus
<i>n</i>	solmupisteiden lukumäärä
<i>P</i>	pätöteho
<i>p</i>	ylittymistodennäköisyys (%)
P_{EV}^{st}	sähköauton pätöteho nimellisjännitteellä
P_k	kuormitushäviöt
$P_{latauspiste}$	latauspisteen teho
P_o	alkutilan pätöteho
P_p	kuormitus
p_x	kerroin
<i>Q</i>	loisteho
Q_o	alkutilan loisteho
q_x	kerroin
<i>R</i>	käyttöresistanssi
r_k	suhteellinen oikosulkuresistanssi
$s_i(t)$	asiakkaan tehon keskihajonta ajanhetkellä <i>t</i>
S_n	nimellisteho
<i>Stoimintasäde</i>	sähköauton toimintasäde
$t_{latausaika}$	sähköauton latausaika
<i>U</i>	jännite
U_h	jännitehäviö
U_{hv}	jännitteenalenema likiarvoyhtälössä
U_N	nimellisjännite

U_n	jännitteenalenema nollajohdolla
U_v	jännitteenalenema vaihejohdolla
U_x	induktiivinen jännitehäviö
U_0	alkutilan jännite
U_1	jännite johdon alkupäässä
U_2	jännite johdon loppupäässä
X	käyttöreaktanssi
X_c	johdon kapasitanssi
X_k	suhteellinen oikosulkureaktanssi
X_L	johdon induktanssi
Y	admittanssi
Y_{nn}	admittanssimatriisin alkio
Z_k	oikosulkuimpedanssi
z_k	suhteellinen oikosulkuimpedanssi
Z_n	impedanssi nollajohdon yli
Z_p	Z-piste, joka kuvaa ylittymistodennäköisyyttä
Z_v	impedanssi vaihejohdon yli
$1+K_f \Delta f$	taajuusriippuvuus kerroin
ε	permittiivisyys
φ	loppupään vaihejännitteen ja virran välinen kulma
ρ	johtimen resistiivisyys
δ	jännitteen kulma
ω	kulmataajuus

1. JOHDANTO

Sähköautot saavat merkittävää maailmanlaajuista kiinnostusta tutkijoilta, mikä voidaan havaita useista tutkimuksista. Sähköautojen lisääntyvä myynti ja kilpailun lisääntyminen teknologian kehityksessä todennäköisesti johtaa myös valmistuskustannusten vähentymiseen, mikä puolestaan vahvistaa sähköautojen kilpailukykyä polttomoottoriautojen rinnalla. Sähköautojen lukumäärän kasvuun liittyy vahvasti myös latauspaikat, joista erityisesti nopeat laturit ovat tärkeitä parantamaan pitkän matkan ajamista sähköautoilla. [1]

Autoilun sähköistyminen ajatellaan ekologisena asiana. Esimerkiksi sähköautojen hyötysuhde (50–80%) on parempi kuin polttomoottoriautoissa (20–25%) [2]. Lisäksi liikenteen osalta sähköautot ovat yksi lupaavimmista ratkaisuista vähentämään liikenteen hiilijalanjälkeä ja taloudellista tehokkuutta [3]. Muita sähköauton hyötyjä ovat esimerkiksi ilmanlaadun parantuminen ja liikenteen melun pieneneminen [1].

Suomessa hallitus on linjannut vuonna 2016 tavoitteeksi 250 000 sähköautoa vuoteen 2030 mennessä. Tavoite julkisten latauspisteiden lukumäärälle samana vuonna on 25 000. Sähköautojen lukumäärän kasvua edistää esimerkiksi hankintatuki (2018–2021), joka on 2000 € täyssähköauton ostajalle sekä pitkäaikaisvuokraajalle. Myös julkiset latauspisteet voivat saada investointitukia (2017–2019) ja lisäksi asuinrakennuksille voidaan myöntää latausinfrastruktuuria (2018–). Tukien avulla on tarkoituksena ohjata ja kannustaa sähköisen liikenteen edistymistä sekä tukea kansallista energia- ja ilmastostrategiaa. [4]

Sähköautoilla voi tulevaisuudessa olla useita vaikutuksia sähköjärjestelmään. Sähköautot voidaan nähdä sähköverkossa kuormana, mitä tässä työssä käsitellään. Kuitenkin sähköautoilla voi tulevaisuudessa olla muitakin rooleja sähköverkossa, kuten hallittava kuorma. Tämä tarkoittaa sitä, että latausta on mahdollista siirtää, rajoittaa tai keskeyttää tarpeen mukaan tietyillä ehdoilla. Lisäksi sähköautot voidaan nähdä tulevaisuudessa sähkövarastona, jolloin auton akustosta siirrettäisiin energiaa tarpeen mukaan ja tietyillä ehdoilla sähköverkkoon. Sähköauton käyttäminen hallittavana kuormana tai energiavarastona lisäisi sähköautoista saatavaa hyötyä. [5]

Tämän työn tavoitteena on selvittää, kuinka hyvin OpenDSS-ohjelmalla voidaan mallintaa sähköauton latausta verkon kuormituksena. Työn hypoteesina on, että sähköauton lataus voidaan mallintaa vakiovirtakuormana OpenDSS-ohjelmalla hyvällä tarkkuudella,

joten tutkimuskysymyksenä tässä työssä tarkastellaan pitääkö hypoteesi paikkaansa. Tutkimusmenetelmänä käytetään laboratoriomittauksia, jotka toteutetaan Tampereen yliopiston (TAU) sähkötekniikan yksikön älykkään sähköverkon (Smart Grids) laboratoriossa. Laboratorio-mittauksilla pyritään verifioimaan OpenDSS-ohjelmalla muodostettu malli sähköauton lataukselle verkon kuormituksena.

Työn toisessa luvussa käydään läpi sähköauton määritelmä. Tämän jälkeen käydään läpi sähköauton lataustavat ja –pistokytkinratkaisut. Lisäksi katsotaan, miten sähköautojen lukumäärä on kehittynyt ja käydään läpi mitä mahdollisuuksia niillä on tulevaisuudessa.

Luku kolme keskittyy sähköverkon mallintamiseen ja alkaa verkon passiivisten komponenttien mallintamisella. Lisäksi esitetään tehonjaon teoria ja käydään Newton-Raphson menetelmä tarkemmin läpi. Lopuksi käsitellään sähköautoa verkon kuormituksena kirjallisuuden ja julkaisuiden pohjalta.

Luku neljä puolestaan keskittyy kiinteistön verkkoon. Ensin käydään läpi kiinteistön komponentteja ja rakennetta. Tämän jälkeen keskitytään sähköauton latauksen liittämiseen kiinteistön verkkoon ja käsitellään muun muassa latauspisteeseen vaadittavaa tehon arvioimista.

Viidennessä luvussa kerrotaan, miten sähköauton latauksen malli on mallinnettu OpenDSS-ohjelmalla, joka esitellään aluksi lyhyesti. Tämän jälkeen esitetään laboratorion mittaustulokset, joiden pohjalta saadaan rakennettua OpenDSS-ohjelmalla malli laboratorion verkolle. Laboratorio-verkon OpenDSS-malli verifioidaan testikuormitusmittauksella, jonka jälkeen verkon malliin liitetään sähköauton latauksen kuormitusta vastaava malli ja lasketaan sähköauton latauksen vaikutus laboratorion verkossa. Lopuksi tehdään vielä mittauksia oikean sähköauton latauksesta laboratorion verkossa ja katsotaan kuinka tarkasti OpenDSS-laskentatulokset ja mittaukset vastaavat toisiaan.

Viimeinen luku on yhteenveto, jossa käydään mittausten tuloksia läpi ja pohditaan kuinka hyvin sähköauton latauksen kuorman malli vastaa mittauksia. Lisäksi käsitellään mahdollisia jatkotutkimuskysymyksiä.

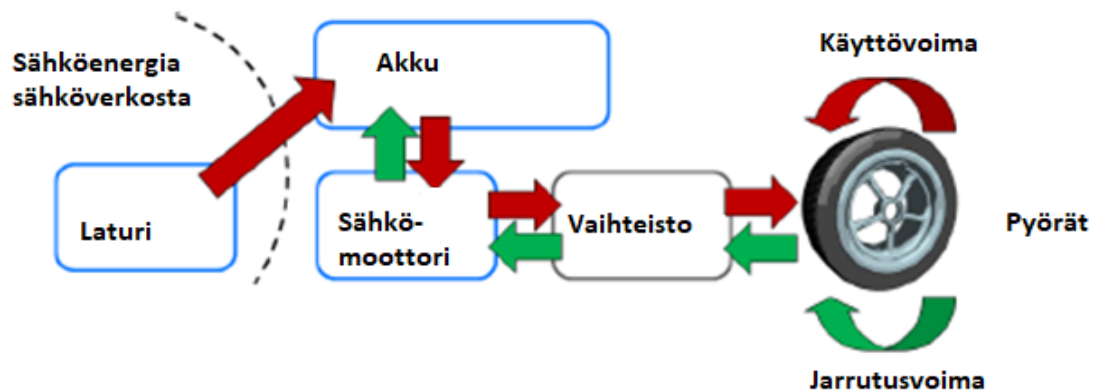
2. SÄHKÖAUTOT JA NIIDEN LATAUSTAVAT

2.1 Sähköauton määritelmä

Sähköauton määritelmä vaihtelee hieman eri lähteissä. Tässä luvussa käsitellään sähköauton, hybridi-auton ja ladattavan hybridi-auton määritelmää.

2.1.1 Sähköauto (EV)

Sähköauto, electric vehicle (EV), tarkoittaa kaikkia auton ulkopuolisesta tehollähteestä ladattavia autoja. Siten lyhenteeseen EV kuuluu sekä täyssähköautot (Battery electric vehicle = BEV) että ladattavat hybridi-autot (Plug-in hybrid electric vehicle = PHEV). Täyssähköautoissa on sähkömoottori ja akku, jota ladataan kuvan 1 mukaisesti. Kaikki energia on peräisin akusta, joten akun tulee olla riittävän suuri. Tyypillisesti akun koko vaihtelee välillä 20–100 kWh, mikä tarkoittaa noin 100–500 km toimintamatkaa. Toimintamatka on kuitenkin vain suuntaa antava ja siihen vaikuttaa esimerkiksi sääolosuhteet ja ajonopeus. [2]

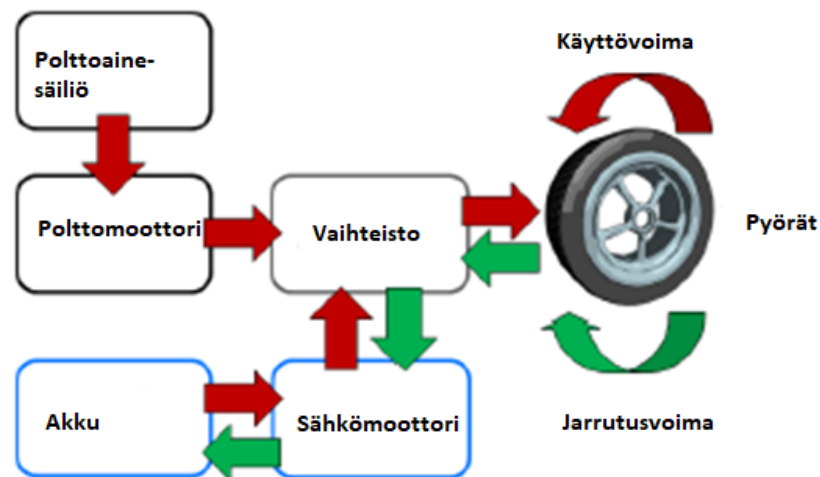


Kuva 1. Sähköauton toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6]

Kuvassa 1 vihreät nuolet näyttävät vastakkaiseen suuntaan kuin miten ajaminen toteutuu. Ne kuvaavat sähköauton kykyä ottaa merkittävä määrä jarrutusenergiaa talteen. Tällöin sähkömoottori toimii kuten generaattori muuntaessa kineettisen tai auton massan potentiaalienergian sähköiseksi energiaksi. Tämä energia voidaan varastoida akkuun ja käyttää uudelleen. Tästä käytetään nimitystä regeneratiivinen jarrutus. Jarrutuksen täytyy kuitenkin tapahtua aina turvallisesti, joten vaadittu jarrutusmomentti on yleensä paljon suurempi kuin sähkömoottorin tuottama vääntömomentti. [7]

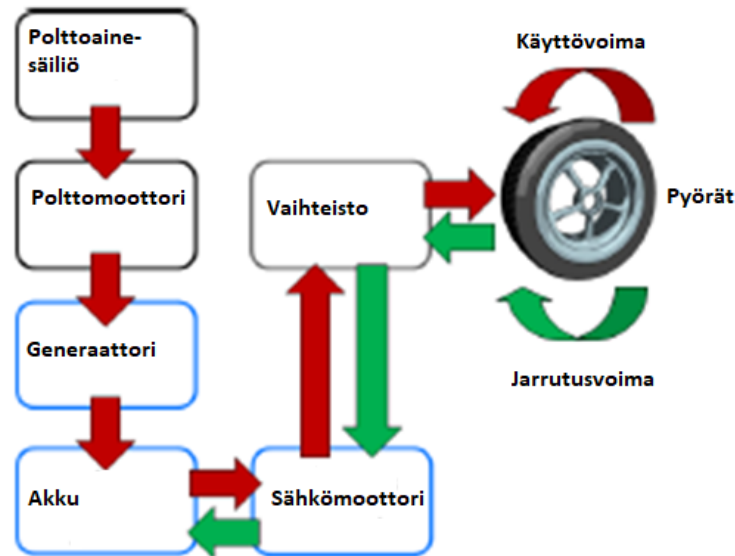
2.1.2 Hybridiauto (HEV)

Hybrid electric vehicle (HEV) eli hybridiauto tarkoittaa autoa, jossa on kaksi voimanlähdettä. Yleensä voimanlähteet ovat polttomoottori ja sähkömoottori yhdessä akun kanssa. Hybridiautoa ei voi ladata auton ulkopuolelta, joten kaikki auton käyttämä energia on peräisin polttoainesäiliöstä. Akku kuitenkin varastoi energiaa tilapäisesti esimerkiksi jarrutuksen aikana ja syöttää sen takaisin pyörille, mitä havainnollistaa myös kuva 2. Jarrutusenergian talteenoton lisäksi akku voi avustaa esimerkiksi liikkeellelähdyssä. Hybridiautossa akun ei tarvitse olla suuri, vaan noin 1 kWh akku on tyypillisesti riittävä. [2, 8]



Kuva 2. Rinnakkaishybridin toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6]

Kuvassa 2 on esitetty rinnakkaishybridin toimintaperiaate. Siinä sekä polttomoottorilla että sähkömoottorilla on mekaaninen kytkentä pyöriin vaihteiston kautta. Kuvan 2 vihreät nuolet kuvaavat kykyä varastoida jarrutusenergiaa akkuun. Kuvassa 3 on esitetty sarjahybridin toimintaperiaate, josta löytyy uutena komponenttina generaattori rinnakkaishybridin toimintaperiaatteeseen verrattuna. [8]

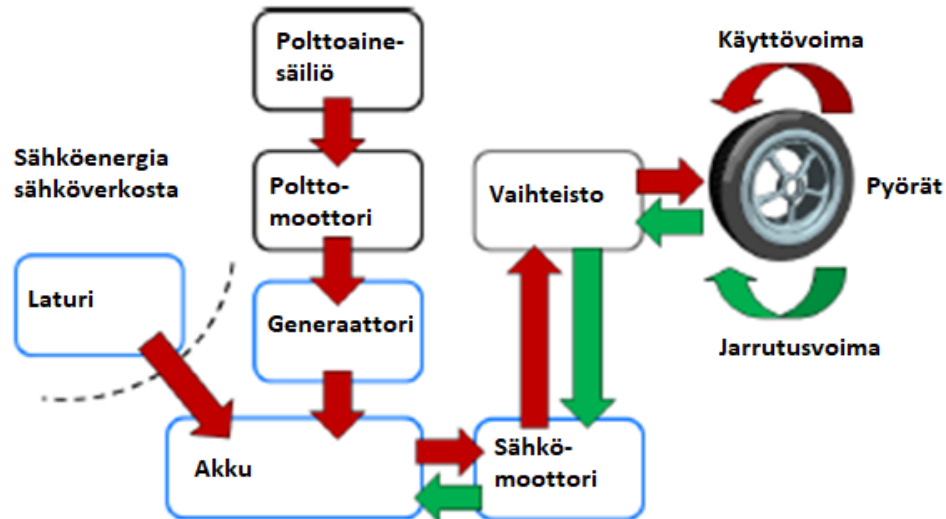


Kuva 3. Sarjahybridin toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6]

Sarjahybridissä kaikki sähköenergia kulkee akun ja sähkömoottorin kautta ja polttomoottori toimii sähköenergiaa syöttävänä voimalaitoksena sähkömoottorille. Tällöin polttomoottorilla ei ole suoraa yhteyttä auton pyöriin vaan sähkömoottori tuottaa kaiken mekaanisen tehon. Lisäksi on olemassa sarja- ja rinnakkaishybridin yhdistelmiä. [8]

2.1.3 Ladattava hybridauto (PHEV)

Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) tarkoittaa ladattavaa hybridautoa. Se eroaa hybridautosta siten, että sitä voidaan ladata, mikä on esitetty myös kuvassa 4. Tällöin myös akkujen tulee olla suurempia verrattuna hybridautoon. Tavallisesti ladattavien hybridautojen akut ovat noin 10 kWh suuruisia, mikä tarkoittaa noin 20–50 kilometrin toimintamatkaa riippuen olosuhteista. [2] Esimerkiksi Suomessa vuonna 2018 eniten rekisteröity PHEV-auto oli Volvo XC60 [9], jonka akkukapasiteetti on 10,4 kWh [10]. Muita yleisiä PHEV-autoja ovat Volvo V60 ja Mitsubishi Outlander [9], joiden akkukapasiteetit ovat 11,2 kWh ja 13,8 kWh, tässä järjestyksessä [11, 12].



Kuva 4. Ladattavan sarjahybridiauton toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [6]

Ladattava hybridiauto pystyy latausmahdollisuuden vuoksi korvaamaan osan polttoaineen käytöstä verkosta saatavalla sähköenergialla. Tällöin kaikki energia ei ole peräisin polttoaineesta niin kuin hybridiauton tapauksessa. Lisäksi ladattava hybridiauto pystyy hyödyntämään jarrutusenergiaa samoin kuin hybridiauto. Ladattavan hybridiauton idea on käyttää mahdollisimman paljon sähköverkosta saatavaa sähköenergiaa ja silloin, kun sen käyttö ei ole mahdollista tai, kun sillä ei yksin saavuteta riittävän suurta tehoa, käytetään polttoainetta polttoainesäiliöstä. [8]

2.2 Lataustavat

Tässä luvussa käydään läpi sähköajoneuvojen lataustavat, jotka ovat määritelty standardissa SFS-EN IEC 61851-1:2019. Lataustavat 1, 2 ja 3 ovat vaihtosähkölatauksia ja lataustapa 4 tasasähkölataus. Tavat 3 ja 4 ovat suositelluimpia tapoja ladata sähköauto. Lisäksi tavat 3 ja 4 tarvitsevat latauslaitteet, joissa on sekä ohjaus- että tiedonsiirtopiirit [13].

2.2.1 Lataustapa 1: Kevyiden sähköajoneuvojen lataaminen

Lataustapa 1 on käytössä lähinnä vain kevyiden sähköajoneuvojen lataamisessa, esimerkiksi sähköpyörissä ja sähkömopoissa. Latausta voidaan käyttää yksi- tai kolmivaiheisena enintään 16 A virralla. Yksivaiheisena jännite on korkeintaan 250 V ja kolmivaiheisena 480 V. Pistorasiana voi olla kolmivaiheinen pistorasia tai Schuko-pistorasia. [2, 14, 15] Pitkäaikaiseen lataamiseen tätä lataustapaa ei kuitenkaan suositella 16 A virralla, koska pistorasian ja sitä syöttävän johdon liitokset voivat löystyä ja pistorasia tai johdon huonot liitokset voivat ylikuumentua [16, 17].

2.2.2 Lataustapa 2: Hidas lataus

Lataustapa 2 on tarkoitettu lähinnä sähköautojen tilapäiseen lataamiseen. Latausta voidaan käyttää yksi- tai kolmivaiheisena enintään 32 A virralla. Yksivaiheisena jännite saa olla korkeintaan 250 V ja kolmivaiheisena 480 V. Pistorasiana on tyypillisesti kolmivaiheinen pistorasia tai Schuko-pistorasia. Kotitalouspistorasian latausvirran käyttö suositellaan rajoitettavan 8 A:iin, koska kotitalouspistorasioiden ei ole suunniteltu kestävään yhtäjaksoisesti 16 A virtaa kuin kaksi tuntia. Teollisuuspistorasiaa tämä ei koske. Latausjohdon tulee sisältää vaatimusten mukaiset ohjaus- ja suojalaiteyksiköt. [2, 14, 15]

2.2.3 Lataustapa 3: Peruslataus

Lataustapa 3 on suositeltu lataustapa sähköautojen lataamiseen. Latausvirta on maksimissaan 63 A, mikä tarkoittaa lataustehoksi noin 43 kW. Pistorasiana on kolmivaiheinen pistorasia, joka on suunniteltu sähköauton lataukseen standardin SFS-EN 62196-2 mukaan. Lataustapa käyttää sähköajoneuvon latausjärjestelmää, jonka avulla voidaan esimerkiksi ohjata kuormitusta ja varmistua oikea kytkentä ajoneuvon ja latauslaitteen välillä. [2, 14, 15]

2.2.4 Lataustapa 4: Teholataus

Lataustapa 4 on myös suunniteltu sähköautojen lataamiseen. Siinä käytössä on ajoneuvon ulkopuolinen laturi, joka syöttää tasasähköä. Tasavirta on nykyisillä latureilla satoja ampeereita, mikä tarkoittaa tehoina 22–150 kW. Varmistuminen ajoneuvon kytketyistä oikein latauspisteeseen ja kuormituksen ohjaus toteutetaan latausjärjestelmän tiedonsiirtoväylällä. [2, 14, 15]

2.2.5 Langaton lataaminen

Langaton lataaminen eroaa tavanomaisesta lataamisesta siten, että energia siirtyy auton ja latausjärjestelmän välillä langattomasti eikä latauskaapeleita tarvita. Langaton lataus jakaantuu kahteen perustyyppiin: dynaamiseen ja staattiseen. Dynaamisessa latauksessa autoa voidaan ladata myös ajaessa tiehen asennetun järjestelmän avulla. Dynaaminen ratkaisu vähentäisi ongelmia sähköauton toimintasäteen osalta. Staattinen lataus puolestaan tapahtuu auton ollessa paikallaan esimerkiksi parkkipaikalla. Tällöin kuljettajan osallistuminen lataukseen minimoidaan, koska sähköautoa ei tarvitse kytkeä latautumaan kaapeleiden avulla. [18, 19]

Molemmissa langattomissa latauksissa energiaa siirretään induktiivisesti kahden käämin välillä. Toinen käämi on ajoneuvon alla ja toinen on upotettu alustaan, kuten tienpintaan.

[14] Dynaamisessa langattomassa latauksessa korostuu liikenteen reitityksen ja sähköauton latauksen keskinäinen riippuvuus. Reititys määrittää sähkön kysyntää langattomissa latausjärjestelmissä, mikä vaikuttaa myös sähkön hinnoitteluun. [3] Kuitenkin dynaamisen latauksen toteuttaminen vaatii todella suuret investoinnit. Staattisessa langattomassa latauksessa puolestaan korostuu esimerkiksi parkkipaikkojen sijainti, joissa on mahdollista ladata langattomasti. Langaton lataus löytyy jo nyt vähäisessä määrin markkinoilta ja se todennäköisesti tulee yleistymään [20].

2.3 Tavallisimmat latauspistokytkimet

Tässä luvussa käydään läpi tavallisimmat latauspistokytkimet. Latauspistokytkimellä tarkoitetaan sekä pistorasian ja pistotulpan yhdistelmää, että ajoneuvopistokkeen ja –vastakkeen yhdistelmää. Pistorasian ja pistotulpan latauspistokytkimistä käsitellään tarkemmin Schuko, mutta myös tavallinen kolmivaiheinen pistorasia sopii lataustapoihin 1 ja 2.

Ajoneuvopistokkeen ja –vastakkeen yhdistelmistä käsitellään Mennekes, CHAdeMO ja CCS. Myös tyyppin 1 pistokytkintä, Yazakia, käytetään lähinnä japanilaisissa ja yhdysvaltalaisissa autoissa yksivaiheisessa latauksessa lataustavoilla 2 ja 3. Lisäksi Teslalla on oma Supercharger-pistokytkin.

Direktiivin [21] mukaan julkisilla normaalitehoisilla vaihtosähkölatausasemilla, joissa teho on enintään 22 kW, tulee olla tyyppin 2 pistorasia tai pistoke. Saman direktiivin perusteella julkisilla suuritehoisilla tasasähkölatausasemilla tulee olla CCS pistoke.

2.3.1 Schuko

Schuko-pistotulppia (kuva 5) voidaan käyttää lataustavoissa 1 ja 2. Sen jännite on 230 V ja maksimivirta 16 A. Standardin SFS 5610 mukaan latausvirtaa tulee kuitenkin rajoittaa, koska niitä ei ole suunniteltu pitkäaikaiseen lataamiseen. Tavallisesti Suomessa latausvirta on rajoitettu 8 A:iin pitkäkestoisessa latauksessa. [15] Pistorasia on myös hyvä tarkistaa ennen sähköauton lataamista, koska pahimmassa tapauksessa korkean kuormituksen seurauksena voi huonokuntoisesta pistorasiasta tai asennuksesta syntyä tulipalo. Tämän takia myös tilapäistä latausta varten on pistorasian kunto varmistettava, jotta vältetään pistorasian tai muiden asennusten ylikuumentumiselta ja mahdolliselta tulipalolta. [22]



Kuva 5. Schuko pistotulppa. [23]

Tällä hetkellä valmisteilla on ”Super-schuko”, jonka tarkoituksena on soveltua jatkuvaan 16 A:n kuormitukseen toisin kuin tavallinen schuko. Tämä vahvennettu kotitalouspistorasia olisi tarkoitus vaihtaa tavallisen schukon tilalle, jotta lataus olisi turvallisempaa 16 A:n virralla. [2]

2.3.2 Mennekes

Yleisin lataustavassa 3 käytetty pistoketyyppi on tyyppin 2 pistoke (kuva 6), josta käytetään myös nimitystä Mennekes. Tämä pistoke on myös oltava julkiseen käyttöön tarkoitetuilla vaihtovirtalatauspisteillä 17.11.2017 alkaen jakeluinfra-direktiivin (2014/94/EU) mukaan.[15]



Kuva 6. Mennekes-pistoke ja -vastake. [24]

Tavallisesti yksivaiheisena ladattava hybridiauto latautuu käyttäen maksimissaan 16 A virtaa. Täyssähköautot voivat käyttää kolmivaiheisena maksimissaan 32 A virtaa, mutta tyyppillisesti myös täyssähköauto latautuu yksivaiheisena käyttäen enimmillään 1x30 A virtaa. Tyyppin 2 pistoketyyppi mahdollistaa virransyötön kolmivaiheisena 63 A asti, mutta auton akuston laturi ja latausaseman maksimivirta määräävät sallitun latausvirran. [24] Usein lataustavan 3 latausasemien maksimivirta Suomessa on 3x32 A.

2.3.3 CHAdeMO ja CCS

CHArge de MOve (CHAdeMo) ja Combined Charging System (CCS) ovat molemmat lataustapaa 4 soveltuvia latauspistokkeita (kuvat 7 ja 8).



Kuva 7. CHAdeMo pistoke. [24]

Sekä CHAdeMO että CCS syöttävät autoon tasavirtaa. Lisäksi laturi on auton ulkopuolella ja se mahdollistaa korkean lataustehon [8]. Tällä hetkellä CHAdeMo mahdollistaa jatkuvaa latausta 100 kW teholla ja huipputeholla 150–200 kW. Suunnitteilla on kuitenkin kasvattaa tehoa 350–400 kW asti. [25]

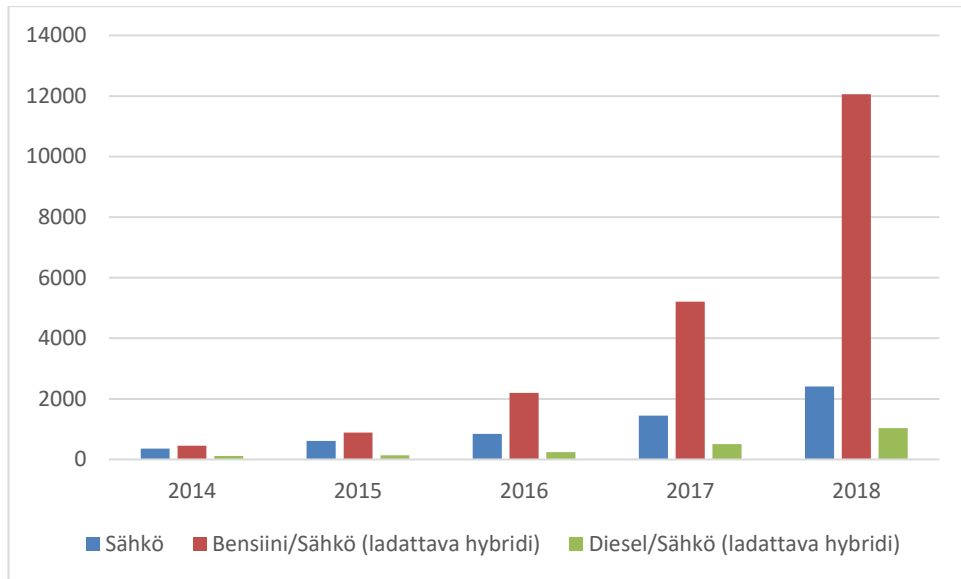


Kuva 8. CCS pistoke ja -vastake. [24]

Combo-vastakkeen ideana on toimia sekä tasavirta että vaihtovirta latauksella. Kun ladataan tasavirralla, käytetään vain ajoneuvon vastakkeen yläosaa. Tasavirtalatauksella puolestaan on käytössä koko vastake ja kuvan 8 pistoke, jolloin alaosa johtaa tasajännitteen sekä -virran. [8] Tällöin on mahdollista käyttää joko lataustapaa 3 tai 4.

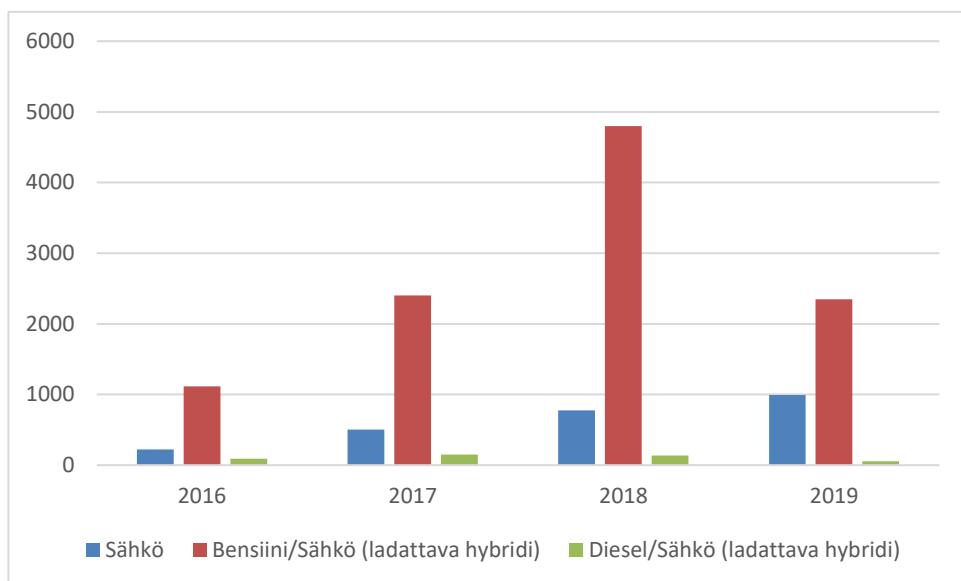
2.4 Sähköautojen lukumäärän kehitys ja tulevaisuus

Sähköautojen lukumäärä on kasvanut viime vuosina. Kuvassa 9 on esitettyä liikennekäytössä olevat sähköautot Suomessa. Sähköautolla tarkoitetaan tässä luvussa sekä täyssähköautoja että ladattavia hybrideitä.



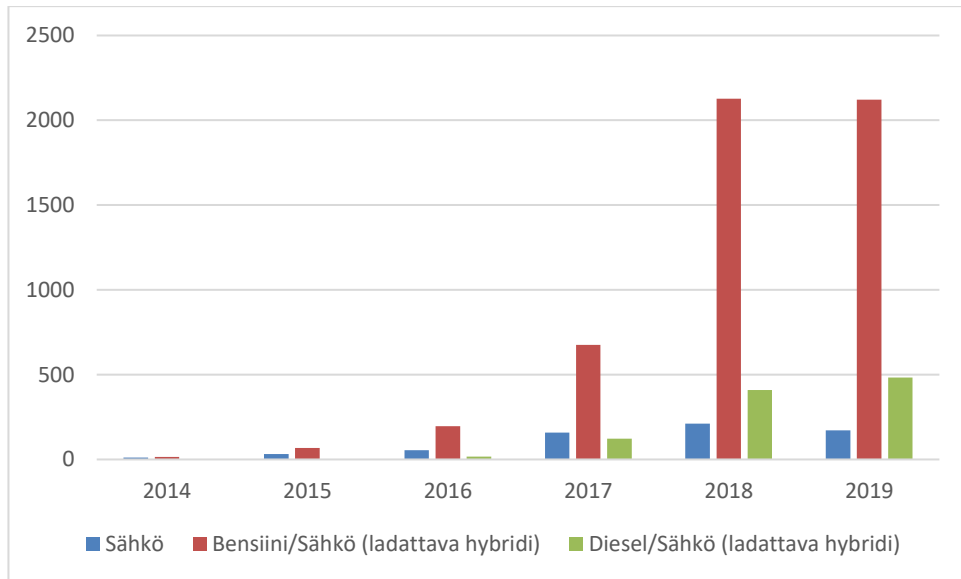
Kuva 9. Suomessa liikennekäytössä olevat sähköautot ja ladattavat hybridit. Tiedot lähteestä [26]

Ladattavia hybrideitä, jotka toimivat bensiinillä ja sähköllä, on selvästi eniten. Kuitenkin kaikissa sähköautojen luokissa voidaan havaita selkeä kasvu. Kuvassa 10 on sähköautojen ensirekisteröinnit ja kuvassa 11 käytettynä maahantuodut sähköautot. Vuoden 2019 osalta tiedot ovat tammi-kesäkuulta.



Kuva 10. Sähköautojen ja ladattavien hybridiautojen ensirekisteröinnit. Vuoden 2019 osalta tiedot ovat tammi-kesäkuulta. Tiedot lähteestä [27]

Myös ensirekisteröintien osalta nopeimmin kasvaa ladattavien hybridien (bensiini/sähkö) lukumäärä. Vuoden 2019 tammi-kesäkuun ajalta määrä on noin puolet vuoden 2018 ladattavien hybridien ensirekisteröinneistä. Tämän perusteella suurta kasvua ei välttämättä tapahdu ensirekisteröinnissä vuosien 2018 ja 2019 välillä.



Kuva 11. Käytetyt maahantuodut sähköautot ja ladattavat hybridit. Vuoden 2019 osalta tiedot ovat tammi-kesäkuulta. Tiedot lähteestä [28]

Käytettyjen maahantuotujen sähköautojen osalta tilanne näyttää kuitenkin selkeältä kasvulta. Vuoden 2019 tammi-kesäkuun ajalta käytettyjä maahantuotuja autoja on lähes yhtä paljon kuin koko vuodelta 2018. Diesel/sähkö-käyttöisiä ladattavia hybridiautoja on jopa enemmän. Tämä viittaa selkeään kasvuun vuoden 2018 ja 2019 välillä käytettyjen maahantuotujen sähköautojen osalta.

Sähköautojen lukumäärä on kasvamassa Suomessa selkeästi. Vuoden 2019 kesäkuuhun mennessä sähköautokanta oli 21 562 kpl, joista täyssähköautojen osuus oli 3 523 kpl ja ladattavien hybridien 18 039 kpl [29]. Liitteessä 1 on esitetty miten sähköautojen osuus jakautuu Suomessa maakunnittain. Siitä voidaan havaita, että eniten sähköautoja on Etelä- ja Länsi-Suomessa.

Myös latauspaikkojen lukumäärä kasvaa. Julkiset latauspaikat sijoittuvat liitteen 2 mukaisesti, mikä vastaa hyvin liitteessä 1 esitettyä sähköautojen sijaintia. Latauspisteellä tarkoitetaan sähköajoneuvon lataamiseen soveltuvaa pistorasiaa tai pistoketta. Latauspisteitä voi siis olla useita yhtä latauspaikkaa kohti.

Sähköautoilla voi myös olla merkittäviä mahdollisuuksia tulevaisuudessa toimia sähkövarastoina sähkövoimajärjestelmän tarpeisiin. Vehicle-to-home (V2H), vehicle-to-grid (V2G) ja vehicle-to-vehicle (V2V) tarkoittavat sähköautosta kotiin, sähköautosta sähköverkkoon ja sähköautosta sähköautoon siirtyvää sähköenergiaa, tässä järjestyksessä. [30] Nämä voivat tuoda sähköverkkoon paljon mahdollisuuksia ja joustavuutta.

V2H mahdollistaa sähköenergian siirtämisen ajoneuvosta kotiin. Tällöin ajoneuvoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tasoittamaan kotitalouden päivittäisiä kuormia siirtämällä

kuormituksen ajankohtaa. Lisäksi se voi lisätä kodin uusiutuvista energianlähteistä saatavaa hyötyä käyttämällä sähköajoneuvoa varastoimaan energiaa tarpeen mukaan. Lisäksi se voi toimia esimerkiksi varavoimalähteenä. Myös V2H voi olla vuorovaikutuksessa V2G tai V2V kanssa. [30]

V2G mahdollistaa sähköenergiansyötön sähköajoneuvosta sähköverkkoon. Sen avulla voidaan käyttää ajoneuvoa hajautettuna energiavarastona, jolloin energiaa voidaan syöttää takaisin sähköverkkoon esimerkiksi huipputehojen aikaan. Tällöin esimerkiksi jakeluverkkoyhtiön voi olla mahdollista välttää tai siirtää myöhemmäksi sähköverkon vahvistamisen tarvetta. [30]

V2V tarvitsee aina vähintään kaksi sähköajoneuvoa, mutta usein useita sähköajoneuvoja. Siinä sähköajoneuvot voivat toimia energianlähteenä toisille sähköajoneuvoille. Sen avulla voidaan myös esimerkiksi alentaa sähköenergian siirtomaksuja paikallisverkossa tapahtuvalla kaupankäynnillä. [30]

3. SÄHKÖVERKON MALLINTAMINEN

3.1 Verkkokomponenttien mallintaminen

Tässä luvussa käydään läpi sähköverkon mallintamista. Luvussa tarkastellaan muuntajaa ja johtoja, jotka ovat passiivisia verkon komponentteja. Verkon kuorma käsitellään luvussa 3.2.

3.1.1 Muuntaja

Muuntajaa käytetään vaihtosähköjärjestelmissä muuntamaan jännitteitä ja virtoja sähkömagneettisen induktion avulla. Muuntajat ovat usein generaattoreiden ja siirtoverkkojen välissä sekä johtojen eri jännitetasojen välissä. [31, 32]

Muuntaja voidaan mallintaa kaavan 1 mukaan oikosulkuimpedanssin Z_k avulla, kun kyseessä on jatkuvan tilan ilmiö. Oikosulkuimpedanssin kaavassa

$$Z_k = z_k \frac{U_N^2}{S_n} \quad (1)$$

U_N on nimellisjännite, S_n muuntajan nimellisteho ja z_k oikosulkuimpedanssi suhteellisarvona. Oikosulkuimpedanssi suhteellisarvona voidaan kirjoittaa muotoon

$$z_k = r_k + x_k, \quad (2)$$

jossa r_k on suhteellinen oikosulkuresistanssi ja x_k suhteellinen oikosulkureaktanssi. Suhteellinen oikosulkuresistanssi voidaan laskea kaavalla

$$r_k = 100 * \frac{P_k}{S_n} \% , \quad (3)$$

jossa P_k on kuormitushäviö. Tämän jälkeen suhteellinen oikosulkureaktanssi saadaan kaavalla

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} . \quad (4)$$

Käsin suoritettavissa laskuissa voidaan olettaa muuntajan resistanssi nolaksi, koska sen arvo on tyypillisesti pieni verrattuna reaktiiviseen komponenttiin. [33]

3.1.2 Johto

Johtojen ominaisuuksia mallinnetaan resistanssin, induktanssin, kapasitanssin ja konduktanssin avulla. Seuraavaksi käsitellään näitä ominaisuuksia tarkemmin, minkä jälkeen määritetään johdolle sijaiskytkentä.

Resistanssi

Sähköjohdon käyttöresistanssiin R vaikuttaa johdinmateriaalin ominaisresistanssi, johtimen pituus ja poikkipinta-ala. Resisttiivisyys ρ kuvaa aineen ominaisuutta vastustaa sähkövirran kulkua aineen läpi ja siitä aiheutuvaa lämpenemistä. [34] Sähköjohdon tasavirran resistanssi voidaan laskea kaavasta

$$R = \frac{\rho l}{A} \Omega, \quad (5)$$

jossa ρ on johtimen resisttiivisyys, l on johtimen pituus ja A on johtimen poikkipinta-ala. [32]

Johtimen vaihtovirtaresistanssi on tasavirtaresistanssia suurempi. Tämä johtuu siitä, että suuremmilla taajuuksilla isompi osa johtimen virrasta ahtautuu kohti johtimen pintaa. Tällöin resistanssi kasvaa hieman, koska johtimen virran kohtaama pinta on pienempi. Vaihtojännitteen taajuus vaikuttaa siis myös resistanssiin. Lisäksi vaikutusta on johdon lämpötilalla, johon vaikuttavat sekä ulkoiset olosuhteet että johdon kuormitus. [33]

Jakeluverkossa ominaisresistanssiarvo pituutta kohti on tyypillisesti 0,2–1,0 Ω/km (alumiini-poikkipinnat 25–130 mm^2). Siirtoverkoissa puolestaan ominaisresistanssiarvo on 0,05–0,1 Ω/km (alumiinipoikkipinnat 250–500 mm^2) [34] Suurten johdinpoikkipintojen takia suurvoimansiirto johdoilla resistanssin merkitys on usein vähäinen, joten sitä ei tarvitse aina huomioida laskuissa. Jakeluverkkolaskuissa puolestaan resistanssilla on merkitystä eikä sitä voida jättää huomioimatta. [35]

Induktanssi

Johdon induktanssi L aiheutuu magneettivuosta, jonka johtimessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa ympärilleen. Sinimuotoisella vaihtovirralla magneettivuo on sinimuotoinen ja se indusoi virtapiiriin vastasähkömotorisen voiman virran aiheuttavalle sähkömotoriselle voimalle. Induktiivinen jännitehäviö U_x syntyy johdossa kumoamaan vastasähkömotorisen voiman, joka on 90° virtaa jäljessä. Induktiivinen jännitehäviö on siis yhtä suuri mutta vastakkainen kuin vastasähkömotorinen voima. Induktiivinen jännitehäviö saadaan kertomalla johdossa kulkeva virta I johdon käyttöreaktanssilla X , joka on virran kulmataajuus ($\omega=2\pi f$) kerrottuna johdon induktanssilla L kaavan 6 mukaan. [34]

$$U_x = I\omega L = IX. \quad (6)$$

Johtimen induktanssi koostuu sekä johtimen sisäisestä ja ulkoisesta induktanssista että keskinäisinduktanssista toisiin johtimiin. Lisäksi rinnakkaisiin johtoihin kuten puhelinkaapeleihin voi indusoitua vaarajännitteitä. Induktanssi kasvaa johtimien välisen etäisyyden

kasvaessa. Jos johtimet ovat lähekkäin kuten ohuet kaapelijohdot, on siellä syntyvä reaktanssi yleensä resistanssin rinnalla pieni. Sen sijaan avojohdoilla reaktanssi saa huomattavia arvoja. Kaapeleilla ominaisreaktanssi on noin $0,1 \Omega/\text{km}$ ja avojohdoilla suuruusluokka on $0,3\text{--}0,4 \Omega/\text{km}$ riippumatta jännitetasosta. [32-34]

Kolmivaihejohtojen eri vaiheiden induktiiviset reaktanssit eivät ole yhtä suuria, elleivät ne sijaitse tasasivuisen kolmion kulmissa toisiinsa nähden. Tämä on kuitenkin hankala toteuttaa, joten pitkillä johdoilla epäsymmetriaa poistetaan vuorottelemalla johtimien asemia pylväissä. Tällöin jokainen johdin on jokaisessa asemassa kolmanneksen matkasta. [33]

Kapasitanssi

Kapasitanssi kuvaa kykyä varastoida sähkövarausta ja sitä on johtimen ja maan välillä (maakapasitanssi C_o) sekä johtimien välillä (keskinäiskapasitanssi C_k). Yhdessä ne muodostavat käyttökapasitanssin C . Johdon käyttökapasitanssiin syntyy vaihtojännitteellä kapasiitiivinen loisvirta (varausvirta), joka on jännitteestä 90° edellä. Käyttökapasitanssin varausvirta voidaan kuvata kaavan

$$I_c = UB = -U\omega C \quad (7)$$

mukaan, kun oletetaan jännitteen pysyvän samassa arvossa koko matkalla. Kaavassa C on johdon käyttökapasitanssi, B johdon susceptanssi ja ω jännitteen kulmataajuus. Myös kapasitanssin osalta on tarpeellista käyttää kolmivaihejohdon vuorottelua, jota on kuvattu induktanssin yhteydessä. [34]

Kapasitanssin suuruus muodostuu johtimien sijoituksesta sekä eristeaineen permittiivisyydestä ϵ , joka kuvaa väliaineen vaikutusta sähkökenttään. Avojojohdoilla eristeaineena on pääosin ilmaa, jonka permittiivisyys on noin 1 eli pieni. Lisäksi johtimen ja maan välinen etäisyys ja johtimien välinen etäisyys ovat suuria, joten kapasitanssit jäävät pieniksi. Sen sijaan kaapelissa, jossa johtimet ovat lähellä toisiaan ja eristeenä kiinteää ainetta, muodostuu merkittävästi isompia kapasitansseja kuin avojohdoilla. [33, 34]

Konduktanssi

Konduktanssi G on resistanssin käänteisarvo ja se kuvaa johtavuutta. Konduktanssi muodostuu johtojen eristeiden vuoto- ja koronahäviöistä. Kaikki eristeet ovat epäideaalisia, joten sähkökentän vaikutuksesta eristeen läpi kulkee pätövirtaa, joka on resistiivistä vuotovirtaa. Vuotovirta I_G johdon alussa saadaan kaavasta 8, kun oletetaan jännitteen pysyvän samassa arvossa koko matkalla.

$$I_G = UG \quad (8)$$

Pienillä jännitteillä avojohtojen ympärillä ilman läpi kulkeva pätövirta on kuitenkin pieni, joten sitä ei yleensä tarvitse huomioida alle 220 kV jännitteillä. Suurjänniteisillä avojohtojen sijaan syntyy koronahäviöitä sähkökentän suuren voimakkuuden vuoksi. [33, 34]

Sijaiskytkentä

Resistanssi ja induktanssi muodostavat yhdessä impedanssin, joka vaikuttaa johdossa pitkittäin. Tätä kuvaa kaava

$$\underline{Z} = R + jX, \quad (9)$$

joka muodostuu reaaliosuudesta R ja imaginaariosuudesta jX . Reaktanssi puolestaan muodostuu induktanssista X_L ja kapasitanssista X_C , jotka on kuvattu kaavoilla 10 ja 11.

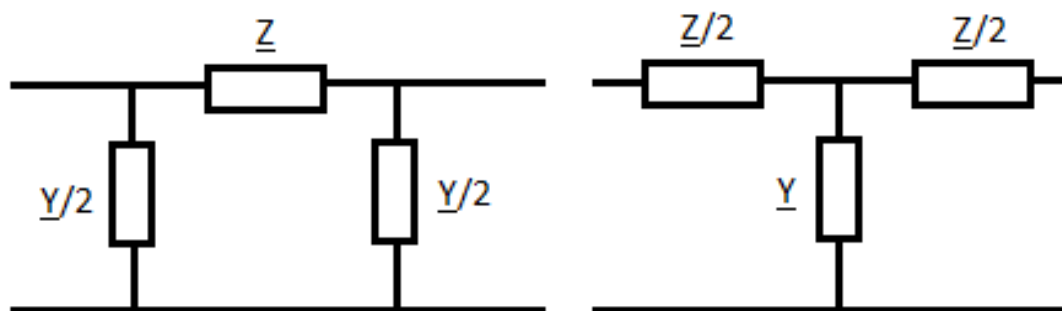
$$X_L = \omega L \quad (10)$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

Kaavoista 10 ja 11 nähdään, että induktiivinen reaktanssi on positiivista ja kapasitiivinen negatiivista. Admittanssi Y muodostuu susceptanssista ja konduktanssista, jotka vaikuttavat puolestaan poikittain johtimien välillä. Tätä kuvaa kaava 12.

$$\underline{Y} = G - jB \quad (12)$$

Kappaleessa 4.2.1. esitetyt ominaisuudet jakautuvat johtopituuksille tasaisesti. Nämä voidaan kuitenkin kuvitella keskittyneeksi, kun johtopituus on alle 200 km ja käyttää π - tai T-sijaiskytkentää (kuva 12). Suuremmilla johtopituuksilla tulee käyttää pitkien johtojen sijaiskytkentöjä. [34]



Kuva 12. Johdon π - sijaiskytkentä (vasemmalla) ja T-sijaiskytkentä (oikealla).

Kuvan 12 kokonaisimpedanssi Z ja kokonaisadmittanssi Y saadaan kaavoista 13 ja 14.

$$\underline{Z} = (r + jl)s = (r + j\omega x)s = R + jX \quad (13)$$

$$\underline{Y} = (g + j\omega c)s = (g + jb)s = G + jB \quad (14)$$

Kaavoissa s kuvaa johdon pituutta. [34]

Yleensä pienjännitejohdoilla ei tarvitse huomioida admittanssia eli riittää ottaa huomioon pitkittäisimpedanssi. Usein alle 220 kV:n jännitteillä konduktanssin voi jättää huomiomatta ja alle 45 kV:n jännitteisellä avojohdolla myös kapasitanssin voi jättää huomiomatta. Poikkeuksena kuitenkin maasulkutarkastelut maasta erotetulle verkolle, jolloin susceptanssi tulee huomioida. [36]

3.2 Kuormituksen mallintaminen

Sähköjärjestelmän vakaa toiminta riippuu muun muassa kyvystä pitää sähkön tuotanto ja kulutus tasapainossa joka hetki. Tämän takia kuorman mallintamisella on tärkeä vaikutus sähköjärjestelmän hallintaan. [37] Lisäksi kuorman käyttäytyminen vaikuttaa merkittävästi verkon laskemalla selvitettyyn siirtokykyyn sekä jännitetasoon. [36]

Kuormituksen mallintamisen tekee vaikeaksi muun muassa kuorman vaihtelevuus sään, päivän ja vuodenajan mukaan. Lisäksi täytyy miettiä, mitkä kuormat kannattaa mallintaa yhtenä kuormana, jotta esimerkiksi sähköjärjestelmän mallintaminen on käytännöllistä. Tämän takia kuormituksen mallintaminen perustuu huomattavaan määrän oletuksia sähköjärjestelmä tasolla. [37]

Kuormituksen mallintaminen voidaan jakaa staattiseen ja dynaamiseen mallintamiseen [37]. Tässä työssä käsitellään staattista kuormituksen mallintamista, koska sitä käytetään tehonjaon laskennassa. Verkostolaskennassa kuormia voidaan kuvata vakioitehokuormina, jolloin ne eivät muutu, kun taajuus ja jännite muuttuvat. Toinen vaihtoehto on kuvata kuormia taajuudesta tai jännitteestä riippuvina suureina. [36] Kuorman kuvaaminen tehonjaon laskennassa on yleisimmin tehty käyttäen pätö- ja loisteholle vakioitehoja. [38]

Pätötehokuormien tapauksessa kuormaa voidaan mallintaa vakioitehokuormana, joka on jännitteestä riippumaton tai vakiovirtakuormana, joka on riippuvainen jännitteestä. Lisäksi vakioimpedanssikuorma, joka on jännitteen neliöstä riippuvainen, on myös tavanomainen pätötehokuormille. Suomen kantaverkon osalta pätötehokuormat jakautuvat edellä mainituille pätötehokuormille seuraavasti: jännitteestä riippumaton vakioitehokuorma (35%), jännitteestä riippuvainen vakiovirtakuorma (40%) ja jännitteeseen kääntäen verrannollinen vakioimpedanssikuorma (25%). Loistehokuormalle käytetään tavallisesti vakiovirtakuormamallia, joka on suoraan verrannollinen jännitteeseen. [36]

Pahin tilanne verkolle voidaan simuloida kuvaamalla kuormat vakioitehokuormina, jolloin tulokset ovat yleensä verkolle huonommat verrattuna todellisuuteen. Toinen tapa on kuvata kuormia vakioimpedanssilla. [36]

ZIP-malli on staattinen kuormamalli, jossa impedanssi, virta ja teho ovat vakioita. Kaavat

$$P = P_0[p_1\bar{U}^2 + p_2\bar{U} + p_3](1 + K_{pf}\Delta f) \quad (15)$$

$$Q = Q_0[q_1\bar{U}^2 + q_2\bar{U} + q_3](1 + K_{qf}\Delta f) \quad (16)$$

kuvaavat kuorman ottamaa pätö- ja loistehoa. Alaindeksi ($\bar{}$) kuvaa alkutilan muuttujia. Ja jännite voidaan ilmaista myös

$$\bar{U} = \frac{U}{U_0}, \quad (17)$$

jossa U on kuorman jännite ja U_0 alkutilan jännite. Kertoimet p_1, p_2, p_3 ja q_1, q_2, q_3 ilmaisevat kunkin komponentin osuutta. Kerroin $(1+K_f\Delta f)$ kuvaa taajuusriippuvuutta, jossa Δf on taajuuspoikkeama ($f-f_0$) ja kerroin K_f vaihtelee pätötehon tapauksessa tyypillisesti välillä 0 ja 3 ja loistehon tapauksessa välillä -2 ja 0. [37]

Yhtälöt 15 ja 16 eivät toimi kovin hyvin matalilla jännitteillä, vaan saattavat tällöin johtaa laskennallisiin ongelmiin. Tällöin kuorman mallintaminen voidaan vaihtaa vakioimpedanssikuormaksi. [37]

Sähköverkon kuormitusta on mahdollista mallintaa myös reaaliaikaisilla mittauksilla. Verkot ovat kuitenkin laajoja, joten käytännössä laajojen mittausten toteuttaminen ei ole mahdollista. Sen sijaan sähkönkäytön laskutuksessa mitattavia vuosienergioita käytetään kuormituksen arviointiin. Tämä ei kuitenkaan riitä informaatioksi seuranta- ja suunnittelulaskentaan, johon tarvitaan tietoa tietyn hetken tehoista. Vuosienergioita on kuitenkin mahdollista muuttaa tehoiksi erilaisilla menetelmillä, jotka perustuvat kuormituksen mittauksiin. [35]

Sähkökäyttäjien sähkökäyttötottumuksia profiloimalla saadaan rakennettua kuormitusmalleja. Nämä kuormitusmallit kuvaavat sähkökäyttäjän sähkökulutusta, joka vaihtelee määrällisesti ja ajallisesti. Malleja käyttäen saadaan arvioitua yksittäiselle sähkökäyttäjälle esimerkiksi tuntikohtainen tehontarve. [35]

Kuormitusmallia tehdessä määritetään ensin sähkökäyttäjistä ryhmät, joiden voidaan olettaa käyttäytyvän riittävällä tarkkuudella sähkökäytön osalta yhtenäisesti ja tehdään niille laajat mittaukset sekä määrällisesti että ajallisesti. [35]

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) järjestelmästä saa reaaliaikaisia mitaustietoja sähköasemien kokonaiskuormituksista. Tätä alempien tasojen kuormituksen jakautuminen arvioidaan käyttäen kuormitusprofiileja, joita käytetään jakeluverkkoyhtiöissä tehonjakolaskennassa. Verkkotietojärjestelmässä laskenta alkaa yksittäiseltä asiakkaalta. Arviot vuosittaisesta energiasta saadaan asiakastietojärjestelmästä (CIS = customer information system), joka sisältää tietoa asiakkaan verkkoliittymästä, tyyppistä ja sähkökulutuksesta. Tämän perusteella yksittäiset asiakkaat ovat luokiteltu luokkiin.

Jokaisen asiakasluokan kuormitusprofiili skaalataan asiakkaiden vuosienergioiden mukaan. Tällöin on tiedossa kuormituksen odotusarvo ja keskihajonta vuoden jokaiselle tunnille. Kuormituksen odotusarvo ja keskihajonta saadaan kaavoista

$$E[P_{ag}(t)] = E[P_1(t)] + E[P_2(t)] + \dots + E[P_n(t)] \quad (18)$$

$$s_{ag}(t) = \sqrt{s_1(t)^2 + s_2(t)^2 + \dots + s_n(t)^2}, \quad (19)$$

joissa $E[P_i(t)]$ on pätötehon odotusarvo ja $s_i(t)$ on asiakkaan pätötehon keskihajonta ajanhetkellä t . Huippukuormituksen laskennassa kuorman stokastinen luonne otetaan huomioon. Laskuissa käytetään laskennallisen kuormituksen ylittymisen todennäköisyydelle erilaisia arvoja. Kaavalla

$$P_p(t) = E[P(t)] + z_p * s(t) \quad (20)$$

saadaan kuormitus P_p , jolla on ylittymistodennäköisyys p (%). Kaavassa z_p on Z-piste, joka kuvaa ylittymistodennäköisyyttä p . Laskennassa käytetty ylittymistodennäköisyyden arvo riippuu laskennasta. Esimerkiksi jännitehäviö-laskennassa merkityksellisiä ovat noin 10 % ylittymistodennäköisyydet. [39]

Toisaalta edellä mainittujen erityyppisten sähkökäyttäjryhmien huipputehot ajoittuvat yleensä eri aikaan ja suurella käyttäjämäärällä satunnaisvaihtelu vähenee. Tämän takia huipunkäyttöaika on suurella käyttäjämäärällä ja erityyppisillä sähkökäyttäjryhmillä suurempaa kuin yksittäisillä kohteilla. [35] Huipunkäyttöaika tarkoittaa aikaa, joka saadaan, kun kuorman vuosikulutus jaetaan kuorman nimellisteholla.

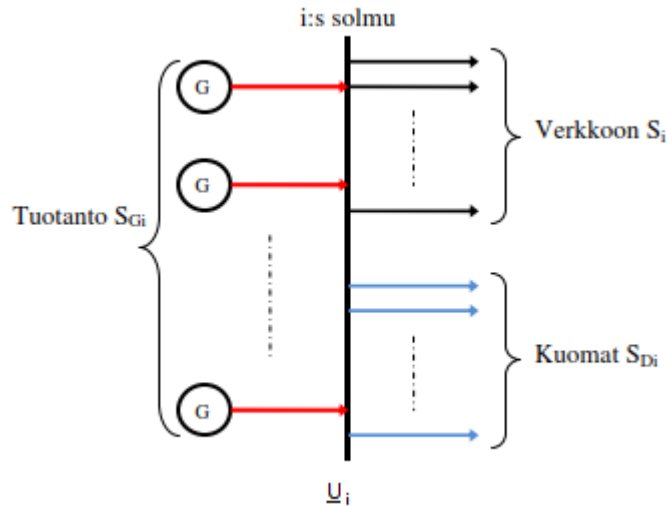
3.3 Tehonjaon laskenta

Tehonjaon ratkaisun avulla saadaan selville tietoa jännitteistä solmupisteissä sekä pätö- ja loistehojen virtauksista johdoilla. Tehonjaon laskentaa käytetään sähköverkon suunnitteluun ja määrittämään nykyisen järjestelmän toimintaa. [32] Suunnittelutehtäviä ovat esimerkiksi verkon investoinnit ja vahvistustarve, kompensointi, huoltoon liittyvät tehtävät ja uusien tuotantolaitosten tarpeen kartoitus. [33]

Tehonjaon laskentaan on olemassa useita eri menetelmiä, kuten Newton-Raphson, Gauss-Seidel, backward forward sweep ja fast decoupled loadflow. Tässä työssä käydään näistä tarkemmin läpi Newton-Raphson-menetelmä.

3.3.1 Solmupisteyhtälöt ja solmupistetyypit

Kuva 13 esittää maliverkkoa, jonka avulla on helpompi hahmottaa solmupisteyhtälöiden muodostuminen. Kuvassa on verkon solmupiste, johon kytkeytyy tietty määrä generaattoreita, kuormituspisteitä ja johtoja, ja solmupisteen jännite on U_i .



Kuva 13. Esimerkki solmupisteyhtälöiden muodostumisesta. [33]

Kullekin solmupisteelle muodostetaan kaavan

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (21)$$

mukainen tehotasapaino yhtälö. Se voidaan jakaa pätö- ja loistehoiksi kaavojen

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (22)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (23)$$

mukaan. Alaindeksi G kuvaa kuormitusta, D kuormaa ja i verkkoon siirtyvää tehoa. [33, 40]

Lauseke

$$\underline{I} = Y_{bus} * \underline{U} \quad , \quad (24)$$

kuvaa solmupisteisiin syötettyjen virtojen, lähdevirtojen, muodostumista admittanssimatriisista ja solmupistejännitteistä. Siinä I on $n \times 1$ -kokoinen lähdevirtojen vektori, U on $n \times 1$ -kokoinen jännitevektori ja Y_{bus} on $n \times n$ -kokoinen admittanssimatriisi, joka voidaan esittää muodossa

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} . [33, 40] \quad (25)$$

Kaavasta 24 solmupistejännitteitä ei voida laskea, koska virtavektoria ei yleensä tunneta suoraan. Sen sijaan virtavektori voidaan esittää tehojen avulla. Pätö- ja loistehoille saadaan yhtälöt, kun lausutaan teho admittanssimatriisin ja jännitteiden avulla

$$P_i + jQ_i = U_i I_i^* \leftrightarrow P_i - jQ_i = U_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} U_k . \quad (26)$$

Lisäksi kun merkitään admittanssimatriisin alkioita

$$Y_{ik} = |Y_{ik}|e^{j\theta_{ik}} = |Y_{ik}| * (\cos\theta_{ik} + j\sin\theta_{ik}) \quad (27)$$

ja jännitteitä solmupisteissä i ja k

$$U_i = |U_i|e^{j\delta_i} \text{ ja } U_k = |U_k|e^{j\delta_k} \quad (28)$$

saadaan varsinaiset tehonjaossa ratkaistavat epälineaariset yhtälöt reaali- ja imaginaariosiin jaettuna

$$P_i = |U_i| \sum_{k=1}^n |U_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (29)$$

$$Q_i = -|U_i| \sum_{k=1}^n |U_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), \quad (30)$$

joissa P_i ja Q_i ovat pätö- ja loisteho solmupisteessä i , n on solmupisteiden lukumäärä, $U_i \angle \delta_i$ jännite solmupisteessä i ja $Y_{ik} \angle \theta_{ik}$ admittanssimatriisin alkio Y_{ik} . [33, 40]

Jokaisessa solmupisteessä on neljä muuttujaa: pätöteho (P), loisteho (Q), jännitteen itseisarvo ($|U|$) ja jännitteen kulma (δ). Näistä kaksi tunnetaan ja kaksi voidaan ratkaista tehonjaon yhtälöiden avulla. Solmupisteet voidaan luokitella solmupistetyyppeihin sen mukaan, mitkä muuttujista ovat tunnettuja. Taulukossa 1 on esitetty tavallisimmat solmupistetyypit. [36, 40]

Taulukko 1. *Solmupistetyypit.*

Solmupistetyyppi	Tunnettu	Lasketaan
Kuormitussolmu (PQ-solmu)	P ja Q	$ U $ ja δ
Generaattorisolmu (PU-solmu)	P ja $ U $	Q ja δ
Vertailusolmu (slack bus, swing bus)	$ U $ ja δ	P ja Q

Vertailusolmu antaa referenssikulman jännitteelle ja sen kulma asetetaan tyyppillisesti arvoon 0° . Ilman vertailusolmupistettä ei tehonjakoa ole mahdollista ratkaista. [33, 36]

3.3.2 Newton-Raphson menetelmä

Newton-Raphson menetelmä (NR-menetelmä) on tehokas menetelmä ratkaisemaan epälineaarisia yhtälöitä. Verrattuna toiseen ratkaisumenetelmään, Gauss-Siedel-menetelmään, NR-menetelmä on nopeampi ja suppenee varmemmin. Huonona puolena on sen viemä suuri määrä tietokoneen muistia. [40]

NR-menetelmässä yhtälöissä 29 ja 30 ryhmitellään ensin PQ-pisteet ja sitten PU-solmut. Tämän jälkeen kirjoitetaan yhtälöt

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_{n-1} \\ \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_{n-m-1} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

joissa n on solmupisteiden ja m generaattoripisteiden lukumäärä. Tällöin kuormituspisteitä on $n-m-1$ kappaletta, koska yksi piste on vertailupiste. H-matriisit voidaan kirjoittaa muodossa

$$\begin{aligned} H_{1ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} & H_{2ij} &= \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \\ H_{3ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} & H_{4ij} &= \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \end{aligned} \quad (32)$$

ja ne ovat Jacobin matriiseja. Tämän jälkeen annetaan jännitteiden itseisarvoille ja kulmille alkuarvot ja lasketaan alkuarvoilla yhtälöistä 29 ja 30 arvot P ja Q . Sitten syötetään yhtälöryhmään 31 laskettujen ja todellisten tehojen erotus. Mikäli erotus on riittävän pieni (noin 10^{-3} pu), päättyy iterointi tähän. Jos erotus ei ole riittävän tarkka, lasketaan Jacobin matriiseista osittaisderivaatat uudelleen, jonka jälkeen matriisit käännetään ja lasketaan jännitteiden itseisarvoille sekä kulmille korjaukset. Korjaukset lisätään jännitteiden itseisarvoihin ja kulmiin, jonka jälkeen lasketaan uudet arvot P ja Q käyttäen kaavoja 29 ja 30. Tämän jälkeen näitä vaiheita toistetaan, kunnes laskettujen ja todellisten tehojen ero on riittävän pieni. [36]

3.4 Sähköauto verkon kuormituksena

Sähköauton latauksen tarkka mallintaminen on vaikeaa, koska kuormituksen ominaisuudet vaihtelevat jatkuvasti [41] ja voivat riippua laturin rakenteesta tai toteutuksesta. Kirjallisuudessa ja julkaisuissa on esitetty sähköauton mallintamiselle verkon kuormituksena useampia vaihtoehtoja. Sähköauton latauksen kuormaa voidaan mallintaa esimerkiksi ajan mukaan vaihtelevana tai jänniteriippuvana kuormana. Tämä luku keskittyy yleisemmin sähköauton latauksen kuorman mallintamiseen, mutta työssä sähköauton latauksen kuorman mallinnus keskittyy lataustehon jänniteriippuvuuteen. Tässä luvussa käsitellään vain yksisuuntaista sähköauton latausta.

Kuorman jänniteriippuvuuden mallintaminen

Viitteessä [41] on mallinnettu sähköauton latausta monivaiheisena aikariippuvana mallina. Julkaisussa sähköauton päto- ja loisteholle saadaan ZIP-mallin mukaiset yhtälöt

$$P_{EV} = P_{EV0}[Zp_{EV}U^2 + Ip_{EV}U + Pp_{EV}] \quad (33)$$

$$Q_{EV} = Q_{EV0}[Zq_{EV}U^2 + Iq_{EV}U + Pq_{EV}], \quad (34)$$

jotka jaetaan vielä vaiheisiin (st) kaavan

$$P_{EV}^{st} = P_{EV0}^{st}[Zp_{EV}^{st}U^2 + Ip_{EV}^{st}U + Pp_{EV}^{st}], \quad st=1, \dots, n \quad (35)$$

mukaan. P_{EV}^{st} kuvaa sähköauton pätötehoa nimellisjännitteellä. Kertoimet Zp_{EV}^{st} , Ip_{EV}^{st} ja Pp_{EV}^{st} on määritelty vakioiksi erikseen jokaiselle ajanjaksolle, joiden pituus määräytyy lataustavan mukaan. [41]

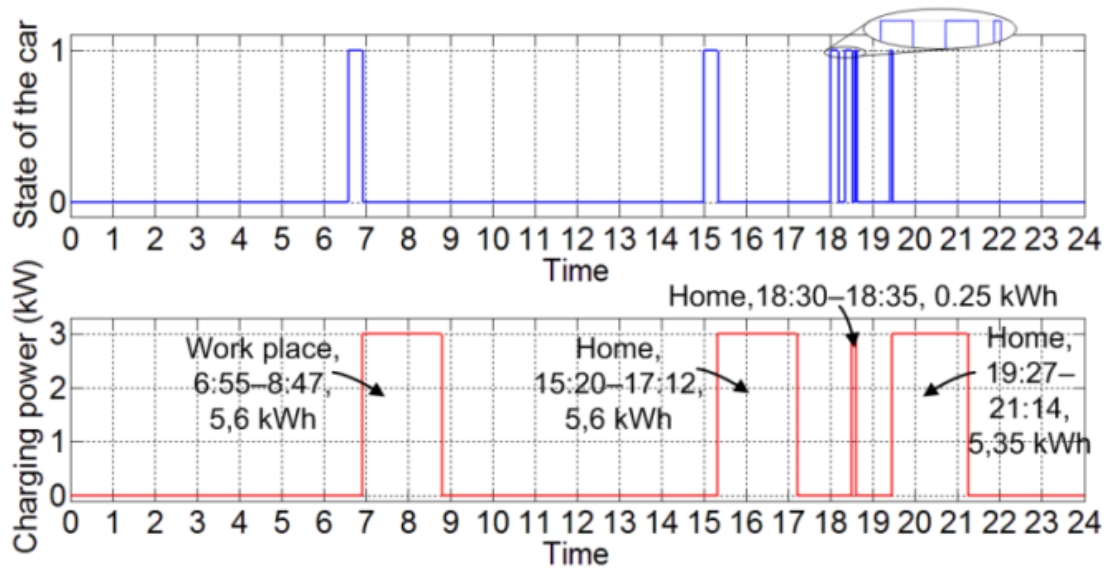
Julkaisu [41] käsittelee sähköauton kuorman mallintamista vakiokuormamallina ja ZIP-mallina ilman monivaiheista sekä monivaiheisen jänniteriippuvan mallin kanssa. Julkaisun mukaan vakiokuormamalli ei anna tarkkaa kuvaa sähköauton kuormasta eikä myöskään ZIP-malli ilman aikariippuvaa monivaiheista kuorman mallia. Täten paperi ehdottaa malliksi ZIP-mallia, joka on monivaiheinen ajasta riippuva malli. [41]

Kuorman tehon jakautuminen ajallisesti

Julkaisu [42] on käyttänyt henkilöliikennetutkimuksen tietoja vuosilta 2004–2005 muodostaessa PHEV:n lataukselle mallia. Henkilöliikennetutkimus sisältää paljon tietoa suomalaisten autoilutottumuksista, kuten päivittäisistä matkoista, autoista ja taustatietoa kyselyyn vastaajasta. Näitä tietoja käyttämällä julkaisussa on muodostettu PHEV:n kuormitusmalli.

Julkaisu olettaa, että PHEV :ä voi käyttää lähes samalla tavalla kuin polttomoottoriautoa ja tästä syystä mallinnus on myös rajoitettu koskemaan vain ladattavia hybridautoja. Lisäksi julkaisussa on useita muita oletuksia, kuten esim. että yksi ihminen ajaa vain yhtä autoa päivässä, vaikka todellisuudessa yksi ihminen voi ajaa useampia autoja päivän aikana.

Lisäksi ajotottumukset ovat jaettu erikseen sekä talvelle että kesälle ja kummallekin ajalle on määritetty erikseen työpäivä, lauantai ja sunnuntai. Julkaisussa on ensin mallinnettu ajotavat ja sen jälkeen ne on muutettu latausmalleiksi. Latausmalleiksi muuttaminen tapahtuu algoritmin avulla, jonka ideana on seurata auton matkoja ja laskea sähkön tarve ja latauksen tila. Tämän jälkeen lasketaan tunneittaiset energiat. Tätä havainnollistaa kuva 14.



Kuva 14. Esimerkki, miten kuormitusta mallinnetaan. [42]

Auton tilan 0 kuvaa sitä, että autoa ei ajeta ja 1 kuvaa, että autoa ajetaan. Lisäksi lataus-teho on vakio 3 kW ja esimerkiksi ajanhetkellä 8:47 lataus loppuu, koska akku on silloin jo täyteen ladattu. Tämä malli sisältää oletuksia, koska todellisuudessa ei ole vielä saatavilla aineistoa suuresta määrästä ladattavia hybridautoja. Kuorman tehon jakautumiseen ajallisesti on myös muita menetelmiä, kuten todellisten sähköautojen latauksien mittaaminen.

4. KIINTEISTÖN VERKON MALLINTAMINEN

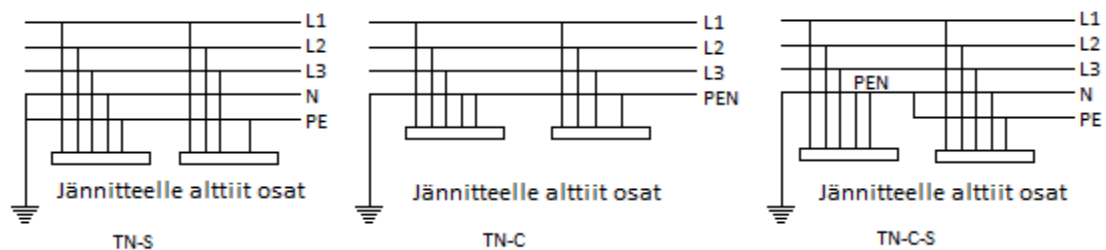
Kiinteistön verkon tehtävänä on siirtää sähköenergia jakeluverkosta kiinteistön kulutus-
pisteille. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti kiinteistö verkkojen rakennetta ja niiden kom-
ponentteja. Tämän jälkeen käsitellään vielä tarkemmin sähköauton latauksen liittämistä
kiinteistö verkkoon.

4.1 Verkon rakenne ja komponentit

Jakelujärjestelmät

Yksi tapa luokitella jakelujärjestelmiä on maadoitustapa. Tyypillisimpiä maadoitusjärjes-
telmiä ovat TN-, TT- tai IT-järjestelmä. Suomessa yleisin on TN-järjestelmät, jotka voi-
daan jakaa vielä suojajohtimen käytön mukaan. IT-järjestelmä voi olla käytössä esimer-
kiksi teollisuudessa, mutta TT-järjestelmä on hyvin harvinainen Suomessa. Tästä syystä
tässä työssä käsitellään tarkemmin vain TN-järjestelmiä. [43]

TN-järjestelmässä virtapiirin yksi piste, yleensä kolmivaihejärjestelmän tähtipiste, on
suoraan maadoitettu. Lisäksi tähän pisteeseen on yhdistetty sähkölaitteistojen ja –lait-
teiden jännitteelle alttiit osat suojajohtimen välityksellä. Suojajohtimen käytön perusteella
TN-järjestelmät voidaan jakaa TN-S-, TN-C- ja TN-C-S-järjestelmiin, jotka ovat esitetty
kuvassa 15. [44]



Kuva 15. TN-järjestelmät.

TN-S-järjestelmässä on suojajohdin, joka on erillinen nollajohtimesta. Yleisesti
rakennusten sähköasennuksissa on nollajohdin käytössä, mutta esim. teollisuuden
moottorikäytöissä se voidaan jättää pois. Tavallisesti johtimia on
kolmivaihejärjestelmässä viisi ($L1+L2+L3+N+PE$) ja yksivaihejärjestelmissä kolme
($L+N+PE$). TN-C-järjestelmässä PEN-johdin toimii sekä nolla- että suojajohtimena.
Kolmivaihejärjestelmissä johtimia on silloin neljä ($L1+L2+L3+PEN$). TN-C-järjestelmien
käyttö ei kuitenkaan ole enää sallittua uudisrakennuksissa. [44]

TN-C-S-järjestelmässä on sekä TN-C- että TN-S-järjestelmän mukaisia osia. Kerran erotettua nolla- ja suojajohdinta ei kuitenkaan saa enää kytkeä PEN johtimeksi, joten TN-C-järjestelmän tulee aina olla syöttävän verkon puolella ja TN-S-järjestelmän tämän jälkeen. [44]

Liittymän mitoittaminen

Rakennusten sähkösuunnittelussa tärkeimpiä asioita ovat sähköverkon ja liittymän mitoitus. Alimitoitettuna voi ilmetä käytönrajoituksia ja toisaalta ylimitoituksesta seuraa ylimääräisiä kuluja. Suunnittelussa tulisi huomioida nykytilan lisäksi myös tulevaisuuden tarpeet. Sähkötehon mitoitus tehdään kohdekohtaisien kuormien mukaan ja lisäksi on hyvä huomioida laajennusvaraus. Jos haluaa pienentää huipputehoa ja parantaa tehojen ohjattavuutta, vaatii se käytännössä kiinteistön suunnittelua niin, että kuormia on mahdollista ohjata. [45]

Liittymisjohdon mitoitus pienjänniteliitymässä voidaan tehdä käyttäen Tampereen Sähköverkko Oy:n taulukkoa 2 apuna muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Taulukossa on ilmoitettu pääsulakkeen koko (A) ja sitä vastaava liittymisjohto. [46]

Taulukko 2. *Tampereen Sähköverkko Oy:n taulukko liittymisjohdon mitoitukselle. [46]*

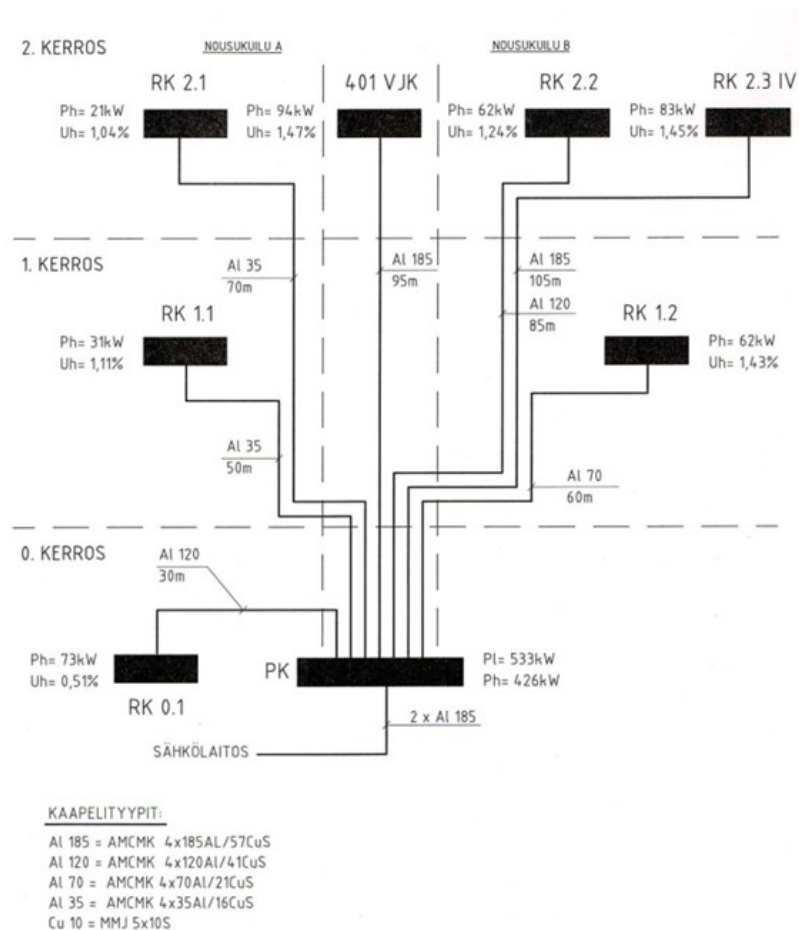
Luokka	A	AXMK mm ²	AMKA mm ²
L025Y	1 x 25	tapauskohtainen	tapauskohtainen
L025 L035 L050 L063 ¹⁾	3 x 25 3 x 35 3 x 50 3 x 63	4 x 25 S	3 x 25 + 35
L080 L100 L125	3 x 80 3 x 100 3 x 125	4 x 95 S	3 x 70 + 95
L160 L200 L250	3 x 160 3 x 200 3 x 250	4 x 185 S	vain erikoistapauksessa
L320 L400	2 x(3 x 160) 2 x(3 x 200)	2 x(4 x 185 S)	
L630	2 x(3 x 315)	2 x(4 x 300 S)	
L750	3 x(3 x 250)	3 x(4 x 300 S)	
L1000 ²⁾	4 x(3 x 250)	4 x(4 x 300 S)	

¹⁾ 63 A tulppasulakkeen käyttäminen pääsulakkeena ei ole sallittua. Määräys koskee sekä uusi liittymiä että liittymäluokan muutoksia.

²⁾ Yksittäisen pienjänniteliittymän suurin liittymäluokka.

Lisäksi liittymälle tulee rakentaa maadoitus. Suositeltu maadoituselektrodi sijaitsee yleensä perustuksissa tai niiden alla ja on renkaan muotoinen. Potentiaalitasauksen tehtävänä on yhdistää rakennuksen johtavat osat, jotta saavutetaan tasapotentiaali. Johtavilla osilla tarkoitetaan jännitteelle alttiita osia sekä muita johtavia osia. Jännitteelle alttiit osat voivat olla esimerkiksi sähkölaitteiden runkoja, jotka tulevat jännitteiseksi vain, jos peruseristys pettää. [47]

Sähköpääkeskus mitoitetaan liittymisjohdon mukaan ja siellä on pääkytkin ja pääsulakkeet. Pääsulake määrittää maksimitehon yhtäaikaiselle kuormalle ja toimii ylikuormitus- ja oikosulkusuojana. Pääkytkimellä on puolestaan mahdollista irrottaa kiinteistön sähköverkko sähkönjakeluverkosta esimerkiksi hätätapauksessa. Pääkeskus siis yhdistää liittymisjohdon avulla kiinteistön verkon sähkönjakeluverkkoon kuvan 16 mukaisesti. Lisäksi siellä on energianmittaus ja suojalaitteet. [48]



Kuva 16. Nousujohtokaavio. [49]

Kuva 16 on nousujohtokaavio ja se kuvaa keskuksia ja niiden välisiä kaapelointeja eli kiinteistönverkon rakennetta. Kuvan mukaisesti pääkeskukseen liitetään ryhmäkeskukset. Ryhmäkeskus syöttää ryhmäjohtoja, jotka menevät sähkölaitteille ja se sisältää muun muassa ryhmäjohtojen suojuksia.

Standardin SFS-EN 50160 mukaan jännitetason vaihtelut saisivat olla maksimissaan $\pm 10\%$ nimellijännitteestä, joka on pienjänniteverkossa 230 V, normaaleissa käyttöolosuhteissa [50]. Tästä syystä johtojen mitoituksessa tulee myös huomioida esimerkiksi jännitteenalenema, jotta jännite pysyy suositelluissa rajoissa kaikissa kulutuspaikoissa.

4.2 Sähköauton latauksen liittäminen kiinteistön verkkoon

Latauksen teho

Latausjärjestelmän suunnittelussa on hyvä selvittää, minkälaista latausta kyseisessä paikassa halutaan eli kuinka suuret toimintasäteet ovat tarpeellisia ja missä ajassa akku tulisi saada ladattua toimintasädeksi vastaavaksi. Latauspisteeseen vaadittavaa tehoa voidaan arvioida kaavan

$$P_{\text{latauspiste}} = \frac{0,2 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} * \text{Stoimintasäde}}{t_{\text{latausaika}}} \quad (36)$$

avulla. Todellisuudessa energiankulutus vaihtelee, mutta suunnittelussa voidaan käyttää arviota 20 kWh/100 km. Päätöksenteon tukena voidaan käyttää myös muuta tutkimustietoa, kuten henkilöliikennetutkimusta. [2]

Liikenneviraston henkilöliikennetutkimuksen mukaan suomalainen matkusti noin tuhat kotimaanmatkaa vuonna 2016. Päivässä kilometrejä kertyy keskimäärin 41 km henkilöä kohti. Yli sadan kilometrin kotimaanmatkoja tehdään vuodessa keskimäärin 19, joista puolet sisältävät vähintään yhden yöpymisen. [51] Näitä tietoja voi käyttää esimerkiksi mitoitettaessa useita latausasemia kiinteistöihin. Tällöin kaavalla 36 lasketaan jokaista eri latauspistettä kohti tehollinen arvo ja ne summataan yhteen.

Vähimmäismitoitus voi tarkoittaa sitä, että latauspisteet voisi toteuttaa yksivaiheisena. Tällä hetkellä myös yleisin lataustapa on 1 x 16 A. Kuitenkin sähköautojen käyttövoimakustojen koot ovat yhä suurempia, mikä tarkoittaa sitä, että latauksen keston tulee olla pidempi tai sen tulee toimia suuremmalla teholla. Yleensä latauksen kesto ei haluta kasvattaa rajattomasti. Tästä syystä latausjärjestelmää suunniteltaessa olisi hyvä suunnitella syöttökaapelointi minimissään 3 x 16 A latausvirralle. [19]

Latausteho saattaa olla myös vähemmän kuin 2 kW. Myös tällöin kaavaa 36 ei tule noudattaa, vaan suositeltu vähimmäismitoitus on 2 kW/latauspiste kuormanhallinnan kanssa ja 4 kW/latauspiste ilman kuormanhallintaa. Tämä johtuu siitä, että SFS-EN 61851 mukaan vähimmäislatausvirta on 6 A, mikä ei kuitenkaan riitä kaikille autoille toimivaan lataukseen. [15]

Hallitsemattomassa latausjärjestelmässä latausjärjestelmän teho huomioidaan täysimääräisenä. Käytännössä kaikkien asemien huipputeho huomioidaan niin, ettei minään hetkenä johdot tai liittymät ylikuormitu. [2]

Sähköauton latauksessa on myös mahdollista käyttää kuormanhallintaa, mikä tarkoittaa sitä, että latausta rajoitetaan tarpeen mukaan. Tällöin tasauskertoimena voidaan käyttää pienempää kuin 1. (Jos kuormanhallintaa ei ole, on tasauskerroin 1). Tasauskertoimen laskentaan vaikuttavat esimerkiksi liittymän koko, latausasemien määrä ja tyyppi, käyttäjien profiili ja käyttöpaikka. [15]

Kuormanhallintaa ei suositella tasasähkölatauksissa, koska nopean tehollatauksen hyöty vähenee, jos tehoa alennetaan ruuhka-aikana. Lisäksi dynaaminen tehon pudotus tasasähkölatauksen aikana ei ole mahdollista kaikille tällä hetkellä oleville ladattaville hybrideille ja täyssähköautoille. [15]

Latauspisteiden toteutus kiinteistön sähköverkossa

Uusissa asennuksissa suositellaan käytettäväksi latausasemia, jotka ovat tarkoitettu sähköautojen lataamiseen. Latauspisteiden sijoitus kiinteistön verkossa tapahtuu tapauskohtaisesti. Jos kuormanhallintaa ei ole käytössä ja kyseessä on pieni latausjärjestelmä, on sijoittelu vapaampaa. Kuorman hallinnan ollessa käytössä ja suuremmissa latausjärjestelmissä puolestaan suositellaan latausjärjestelmän erottamista muusta jakelusta omalla ryhmäkeskuksella. Tällöin niiden kuormanhallinta voidaan toteuttaa helpommin ja sen avulla voidaan mitoittaa kaapelit taloudellisemmin. [15]

Kun latausasemaa mitoitetaan liitettäväksi sähköverkkoon, keskeisintä on selvittää sähköliittymän suurin sallittu teho, pääsulakkeen koko ja liittymän huippukuormitus. Tarvittaessa liittymän kokoa voi olla mahdollista kasvattaa tai latausta varten voidaan hankkia oma sähköliittymä. Esimerkiksi 3 x 25 A liittymässä on mahdollista liittää latauspiste, joka on 3 x 16 A, mutta samaan aikaan ei tule kytkeä esim. sähkökiuasta päälle. Nämä ovat kuitenkin tapauskohtaisia ja riippuvat verkon muista kuormista ja esimerkiksi siitä onko suorasähkölämmitys käytössä. [19]

Kuormituksen ohjaus voi olla myös yksi ratkaisu ja se voidaan toteuttaa sähkökuormien vuorottelulla, lataustehon puolittamisella tai lataustehon portaattomalla säädöllä. Lataustehon säätäminen alaspäin tapahtuu vain kuormituksen noustessa eli vasta, kun täyttä tehoa ei enää ole saatavilla kaikille autoille. [15]

Suositteluin vaihtoehto latauspisteiden kaapeloinnille on säteittäinen kaapelointi, mikä tarkoittaa sitä, että jokainen latauspiste on kaapeloitu omaksi ryhmäksi. Säteittäisissä syöttökaapeloinneissa on myös hyvä huomioida vinokuorman mahdollisuus vuorottelemalla vaiheita L1, L2 ja L3 latausaseman 1. liittimessä, jotta yksivaiheiset lataukset eivät

aiheuta vinokuormaa L1:lle. Latausaseman kaapeloinnin yhteydessä on hyvä huomioida tarvittavat ohjaukset ja maksujärjestelmien toteutus, mikäli niitä tarvitaan. [15]

Kaikki latauspisteet tulee suunnitella oman ylivirtasuojan sekä vikavirtasuojan taakse eli omaksi virtapiirikseen. Tämä takaa sen, ettei muut lataukset häiriinny, jos yhdessä latauksessa ilmenee häiriötä. Vähimmäisvaatimukset latauspisteen suojaukselle on 30 mA:n A-tyyppin vikavirtasuojaja. Lisäksi jokainen SFS-EN 62196:n mukaisilla pistokkeilla tai pistorasioilla varustettu latauspiste tulee suojata B-tyyppin vikavirtasuojalla tai A-tyyppin vikavirtasuojalla, joka on yhdistettynä 6 mA:n tasasähkövikavirta-suojaukseen. [2]

Näiden lisäksi taloyhtiöissä päätöksentekoon latauspisteiden liittämistä kiinteistöön tarvitaan kiinteistön omistajan päätös. Asunto-osakeyhtiössä latauspisteiden rakentaminen voi edellyttää yhtiökokouksessa enemmistöä tai kaikkien osakkaiden suostumusta riippuen hankkeen tyyppistä liitteen C mukaan. Lisäksi kustannukset tulee jakaa tasapuolisesti ja lähtökohtana on kaikkien osakkaiden yhdenvertainen kohtelu. [52]

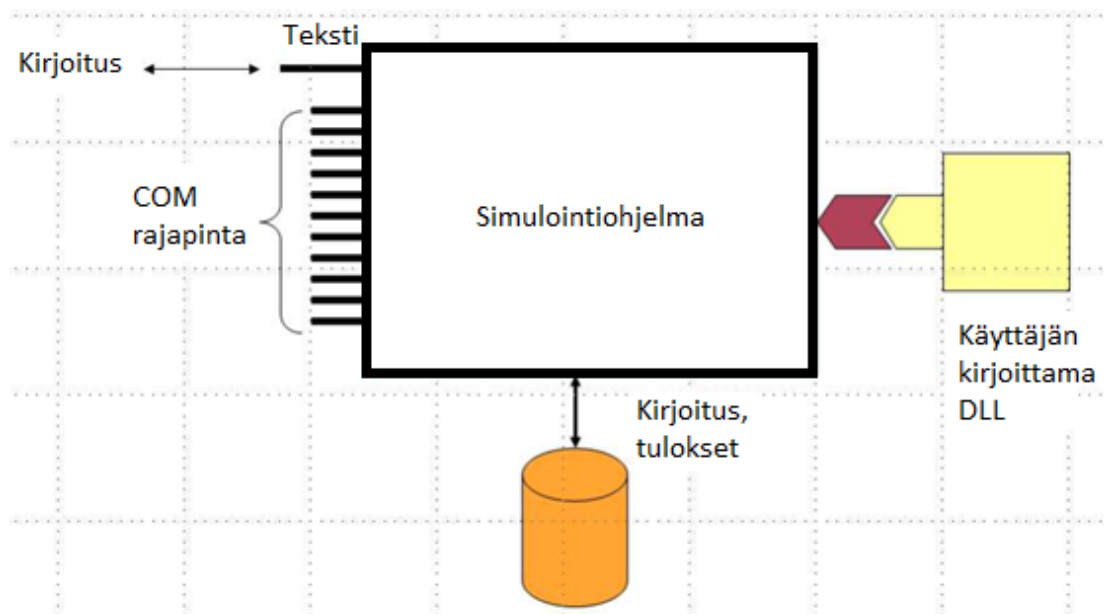
5. SÄHKÖAUTON LATAUKSEN MALLINTAMINEN OPENDSS-LASKENTASOVELLUKSESSA

Tässä luvussa esitellään OpenDSS-laskentasovellusta yleisellä tasolla. Tämän jälkeen esitellään testiympäristönä käytettävän Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikön älykkään sähköverkon (Smart Grids) laboratorion tarkasteltavan osan malli, joka on tehty OpenDSS-ohjelmalla laboratoriomittausten pohjalta. Sen jälkeen esitellään sähköauton latauksen OpenDSS-malli ja sen laboratoriomittauksiin perustuva verifiointi.

5.1 OpenDSS-laskentasovellus

Open Distribution System Simulator (OpenDSS) on sähköjakelujärjestelmien simulointityökalu, joka käyttää avointa lähdekoodia. Sen on julkaissut Electric Power Research Institute (EPRI), joka on yhdysvaltalainen voittoa tavoittelematon organisaatio. EPRI toteuttaa tutkimus-, kehitys- ja esittelyhankkeita keskittyen sähköntuotantoon, -siirtoon ja -käyttöön. [53, 54]

OpenDSS-ohjelmaa käytetään pääasiassa sähköjakeluverkon mallintamiseen ja analysointiin. Sillä voidaan simuloida esimerkiksi hajautettua tuotantoa ja sähköautojen vaikutuksia jakeluverkossa. Ohjelmalla voidaan ratkaista muun muassa tehonjako ja tehdä vikavirtalaskentaa. [54] Kuvassa 17 on esitetty OpenDSS:n rakenne.

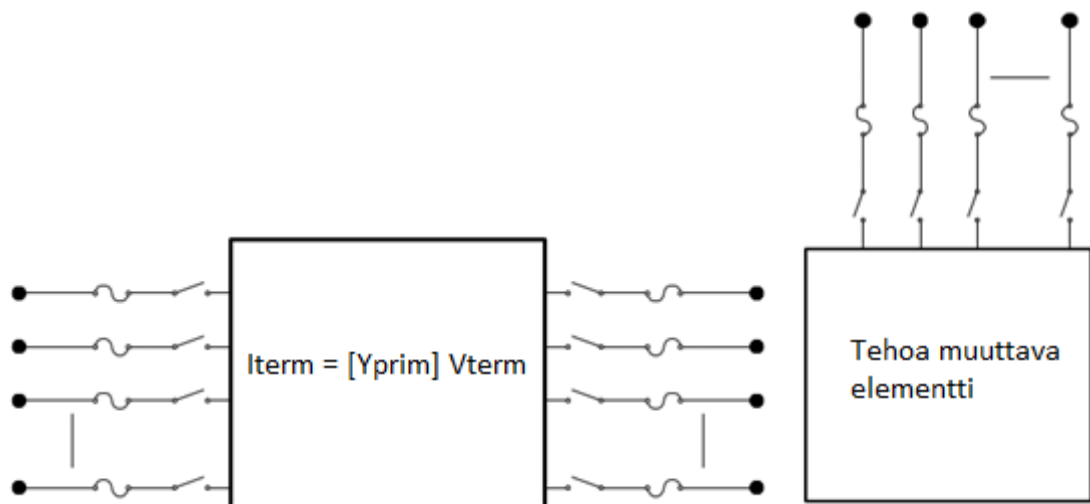


Kuva 17. OpenDSS:n rakenne. Muokattu lähteestä [54].

Kuvan 2 mukaan OpenDSS:ssä on "simulointiohjelma", jossa on komentorivipohjainen käyttöliittymä. Ajettuaan ohjelman, käyttäjä saa tulokset ulos. Riippuen työssä tarvittavista ominaisuuksista ja laajuudesta, joihinkin tapauksiin tämä on jo riittävä työkalu.

Toinen vaihtoehto on käyttää Component Object Model (COM) rajapintaa. Tämän kautta käyttäjä voi ajaa OpenDSS-ohjelmaa toisen ohjelman/alustan, kuten MATLABin tai Pythonin, kautta. Tällöin käyttäjä voi suunnitella ja toteuttaa malleja ulkoisesta ohjelmasta. Tämä mahdollistaa ulkoisten järjestelmien tarjoamien analyysi- ja havainnollistamisominaisuuksien käytön. [54]

OpenDSS-ohjelmaa käytetään mallintamaan sähköjärjestelmää. Tällöin sähköjärjestelmän komponenteille, kuten muuntajalle, johdoille ja generaattoreille tulee olla mallit. Nämä komponenttien mallit jaetaan OpenDSS:ssä tehoa siirtäviin (PD = power delivery) ja tehoa muuntaviin (PC = power conversion) malleihin ja niiden toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 18. [54]

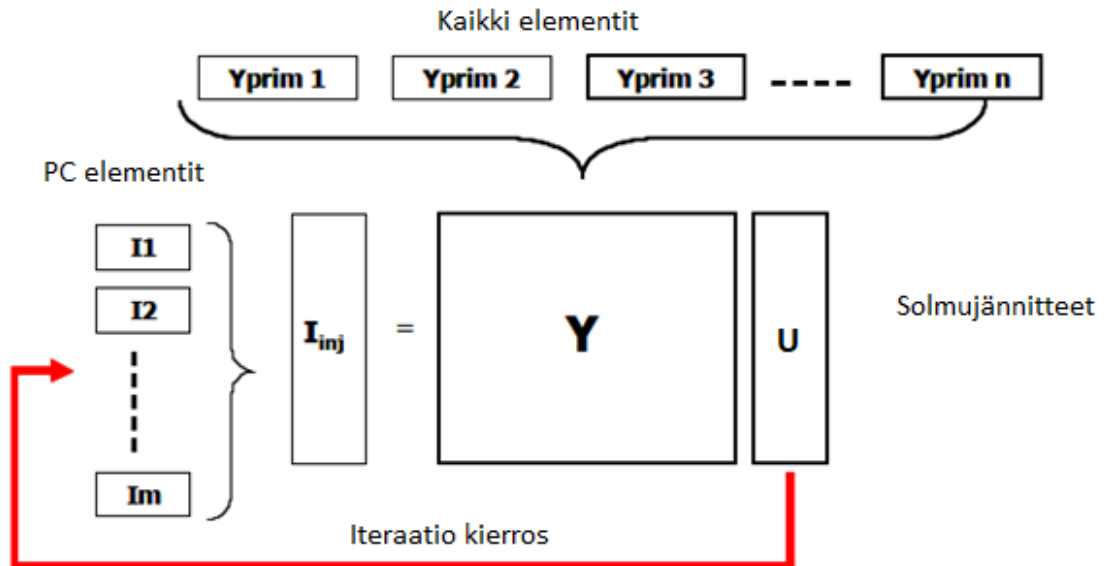


Kuva 18. Tehoa siirtävä ja tehoa muuttava malli. Muokattu lähteestä [54].

Tehoa siirtävän elementin, kuten johto tai muuntaja, tarkoitus on siirtää energiaa yhdestä pisteestä toiseen. Ne voivat kuvan 18 mukaisesti koostua kahdesta tai useammasta navasta. Tällainen elementti voidaan mallintaa impedansseilla, kun kyseessä on verkon jatkuva tila. OpenDSS mallintaa tämän admittanssimatriisina Y . [54]

Tehoa muuttava elementti, kuten generaattori tai kuorma, puolestaan muuntaa tehoa sähköisestä muodosta toiseen muotoon tai toisin päin. Näillä elementeillä on usein vain yksi yhteys sähköjärjestelmään eli ne ovat yksinapaisia. OpenDSS mallintaa näitä epälinearisia elementtejä tyypillisesti admittanssilla, joka on vakio ja jonka rinnalle kytketään kompensoiva/syöttävä virtalähde. [54]

OpenDSS:n tehonjaon ratkaisutapa on esitetty kuvassa 19 ja se alkaa laskemalla koko järjestelmää kuvaava admittanssimatriisi Y . Se muodostetaan kaikista piirielementtien admittanssimatriiseista Y_{prim} . Tämän jälkeen tehdään alkuarvaus jännitteille kaavalla $I=YU$. [54] (37)



Kuva 19. OpenDSS:n tehonjaon ratkaisutapa. Muokattu lähteestä [54].

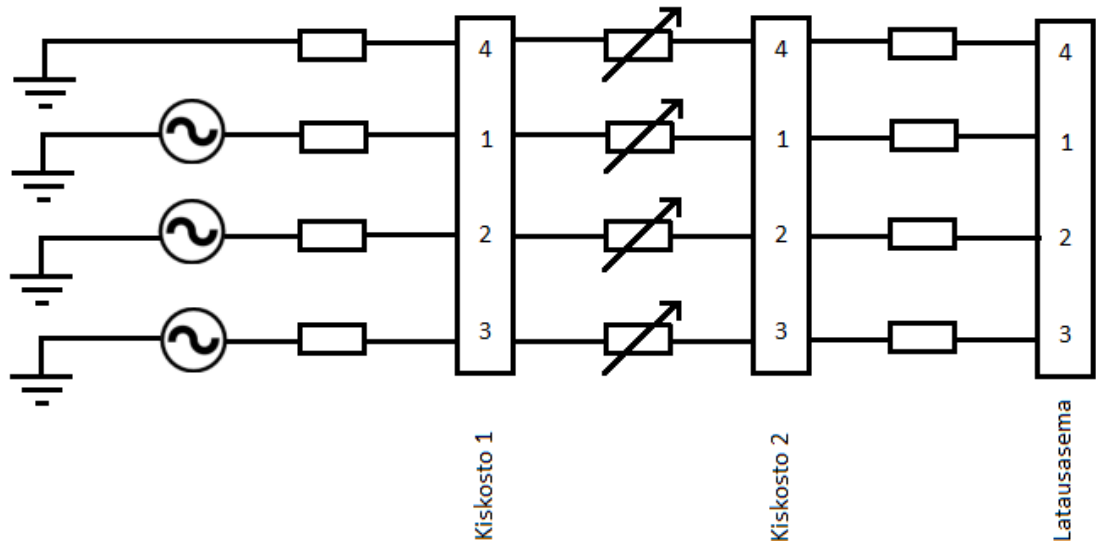
Sen jälkeen alkaa varsinaiset iterointikierrokset, joissa ratkaistaan järjestelmän virrat. Tässä kohtaa myös tehoa muuntavien elementtien syöttävät virrat lisätään virtavektoriin kuvan 19 mukaisesti. Uudet solmujännitteet saadaan kaavasta

$$U_{n+1} = [Y_{\text{system}}]^{-1} I_{\text{inj}}(U_n), \quad (38)$$

jossa U on jännitevektori, Y kokonaisadmittanssimatriisi ja I virtavektori. Tämän jälkeen aloitetaan uusi iteraatiokierrös, kunnes solmujännitteet ovat riittävän tarkkoja. [54]

5.2 Mittaukset laboratorion verkon mallintamiseen

Tässä luvussa käydään ensin läpi minkälaisia mittauksia laboratoriossa tehdään ja mitä niillä halutaan saada selville. Tämän jälkeen esitetään mittaustulokset. Laboratoriomittausten avulla rakennetaan laboratorion verkosta malli OpenDSS-laskentasovelluksella. Laboratorion osa, joka tässä työssä mallinnetaan, on havainnollistettu kuvassa 20.



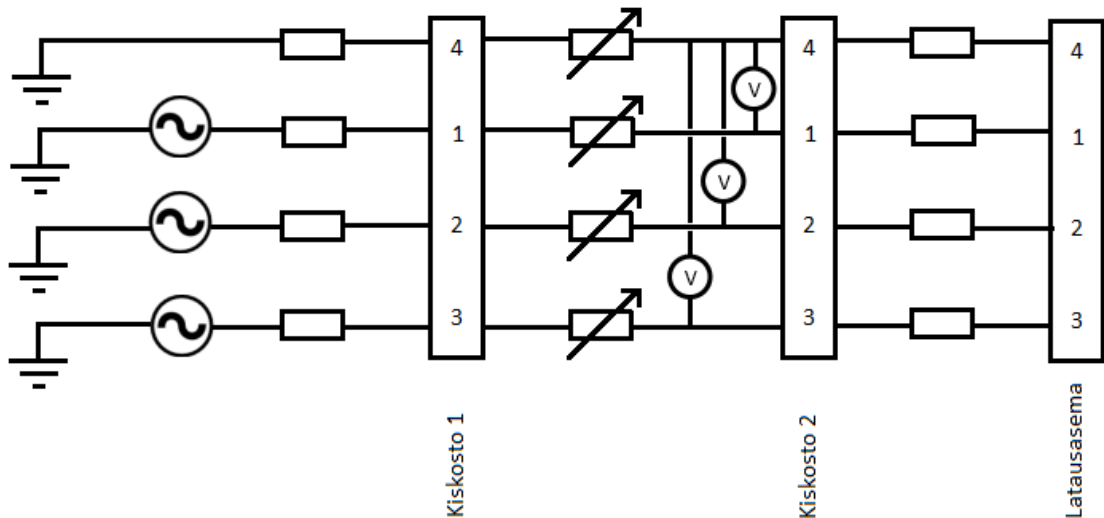
Kuva 20. Laboratorion mallinnettava osa.

Verkon malli mallinnetaan kolmella yksivaiheisella jännitelähteellä. Nollajohdin on kuvattu ilman jännitelähdettä olevana johtimena. Ennen kiskostoa 2 on säätövastus, jota on mahdollista säätää kuuteen eri asentoon sekä vaihejohtimen että nollajohtimen osalta. Kiskoston jälkeen on lataustavan 3 mukainen latausasema, Schneider EVlink (EV 1S7P02). Sillä on mahdollista ladata sähköautoa yksivaiheisena ja latausvirta on rajoitettu maksimissaan 16 A:iin. Mittaukset mitataan pääosin mittalaitteella Dranetz Power-Explorer® PX5-XFAST. Säätövastuksen mittauksessa (mittaus 4) käytettiin Keysight LCR U1733C -mittaria.

5.2.1 Laboratoriomittausten toteutus

MITTAUS 1: Jännitemittaus

Ensimmäisessä mittauksessa selvitetään, kuinka paljon jännite vaihtelee normaalissa tilanteessa ilman kuormitusta. Tätä varten jännitemittaus suoritetaan jokaisen vaiheen ja nollajohtimen väliltä sekä nollajohtimen ja suojajohtimen väliltä kahden päivän ajalta. Mittaus tapahtuu kiskoston 2 vasemmalta puolelta kuvan 21 mukaan.



Kuva 21. Jännitemittaus.

MITTAUS 2: Jännitehäviömittaus

Jännitehäviö tarkoittaa johdolla alku- ja loppupään jännitteiden osoittimien välistä erotusta

$$\bar{U}_h = \bar{U}_1 - \bar{U}_2, \quad (39)$$

jossa \bar{U}_1 on alkupään jännite ja \bar{U}_2 loppupään jännite. Jakeluverkossa voidaan käyttää vaihejännitteelle myös jänniteenaleneman likiarvoyhtälöä

$$U_{hv} = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi, \quad (40)$$

jossa I on virta, R kokonaisresistanssi vaihejohtimella, X kokonaisreaktanssi vaihejohtimella ja φ loppupään vaihejännitteen ja virran välinen kulma. Jänniteenalenema on likiarvoinen suure, koska se ei huomioi jännitteiden välistä kulmaeroa, joka on yleensä käytännössä merkityksettömän pieni jakeluverkon tarkasteluissa.

Tässä mittauksessa mitataan jännitettä ja virtaa latausaseman liityntäpisteestä sekä kiskostosta, jotka ovat kuvassa 20 kohdat kiskosto 2 ja latausasema. Jännitemittauksessa jännite mitataan vaihejohtimen ja nollajohtimen väliltä sekä nollajohtimen ja suojajohtimen väliltä. Näiden avulla saadaan laskettua vaihe- ja nollaimpedanssi kaavoista

$$\bar{Z}_v = \frac{\bar{U}_v}{\bar{I}} \text{ ja} \quad (41)$$

$$\bar{Z}_n = \frac{\bar{U}_n}{\bar{I}}, \quad (42)$$

kun virta todetaan mittauksella likimäärin yhtä suureksi vaihejohtimessa sekä nollajohtimessa. Kaavassa \bar{Z}_v on vaihejohtimen impedanssi, \bar{Z}_n nollajohtimen impedanssi, \bar{I} joh-

timissa kulkeva virta, \bar{U}_v jännitteenalenema vaihejohtimessa ja \bar{U}_n jännitteenalenema nol-lajohtimessa. Jännitteenalenemat lasketaan tässä työssä käyttäen jännitteiden osoitti-mien erotusta (kaava 39).

Mittauksessa ei huomioida latausaseman ja mitattavan sähköauton väliin jäävää lataus-kaapelia, koska mittauspisteet sähköauton latauksen mittauksessa ovat kiskosto 2 ja la-tausasema. Tätä ei myöskään mallinneta sähköauton latauksen mallissa.

Latausasema on yksivaiheinen, joten mittaus suoritetaan vain yhdelle vaiheelle. Yksivai-heisen jännitehäviön sijaiskytkentä pätee myös symmetrisissä kolmivaihejärjestelmissä kaikille kolmelle vaiheelle.

MITTAUS 3: Oikosulkukoe

Kolmannessa mittauksessa tehdään yksivaiheinen oikosulku kaikille kolmelle vaiheille erikseen, jotta vältetään mahdollinen vaiheiden välinen epäsymmetria. Siinä vaihejännit-teen ja nol-lajohtimen väliin kytketään vikaresistanssi kiskostoon 2 (kuva 20). Tämän jäl-keen mitataan oikosulun aikainen jännite ja virta. Mittaus toistetaan kaikille vaiheille.

Näistä mittaustuloksista saadaan määritettyä oikosulkuimpedanssi jokaiselle vaiheelle. Oikosulkuimpedanssi saadaan jakamalla oikosulkujännite oikosulkuvirralla kaavan

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} \quad (43)$$

mukaan, jossa \bar{U}_n on oikosulkuimpedanssin yli oleva jännite ja \bar{I} on virta.

MITTAUS 4: Säätvastuksen impedanssin mittaus

Oikosulkukokeessa säätvastusta ei huomioitu, joten se mitataan erikseen mittauksessa neljä. Säätvastuksen asennoissa 0, 1, 2 ja 3 mitataan resistanssi ja induktanssi kaikille vaiheille ja nol-lavaiheelle. Induktanssista lasketaan vielä reaktanssi kaavan

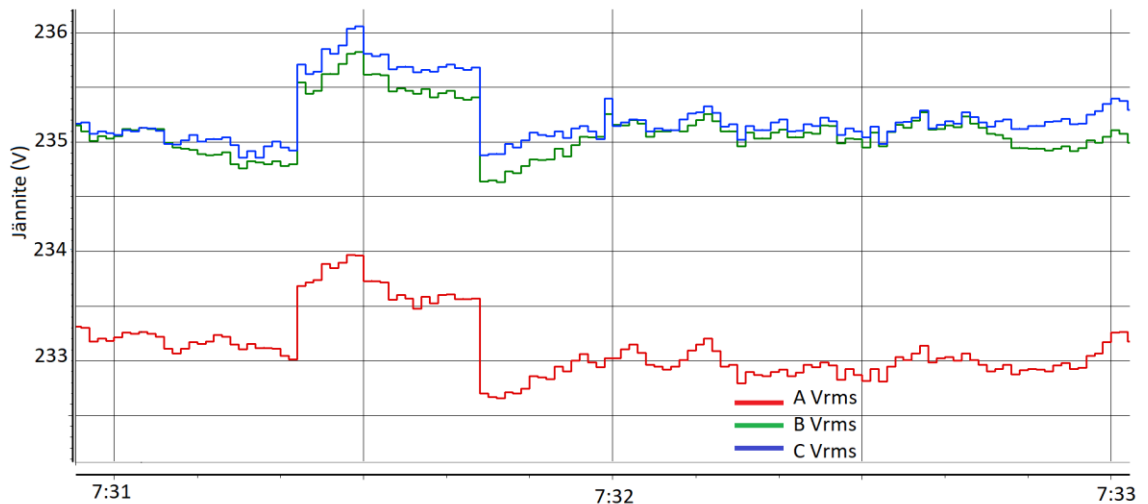
$$\bar{X} = j\omega L \quad (44)$$

mukaan, jossa \bar{X} on reaktanssi, $\omega=2\pi f$ on kulmataajuus ja L induktanssi.

5.2.2 Laboratoriomittausten tulokset

MITTAUS 1: Jännitemittaus

Jännitemittaus suoritettiin 11.4.–12.4. välisenä aikana ja kytkentä tehtiin kohdan 5.2.1 mukaan. Liitteessä D on aikaväliä 7:30–7:55 ote jännitemittauksesta 12.4.2019. Tästä kahden minuutin ajanjakso on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Jännitemittaus klo 7:31 –7:33.

Kuvasta 22 voi havaita jokaisen vaihejännitteen vaihtelun olevan reilu 1 V jo 2 minuutin ajanjaksolla. Lisäksi kuvassa on havaittavissa vaiheiden välillä hieman epäsymmetriaa. Liitteen D ajanjaksolla suurimmat ja pienimmät jännitteet ovat taulukoitu taulukkoon 3 ja niistä on laskettu erotus.

Taulukko 3. Jännitemittauksen tulokset 12.4.2019 klo 7:30–7:55.

	Min (V)	Max (V)	Erotus (V)
A Vrms	232,3	234,1	1,8
B Vrms	234,2	236,3	2,1
C Vrms	233,9	236,2	2,3

Taulukon 3 mukaan suurin vaihtelu 25 minuutin aikana on vaiheessa C 2,3 V. Samanlainen tarkastelu on toistettu myös ajanjaksoille 11.4.2019 klo 19:10–20:10 ja 12.4.2019 klo 16:20–17:20, jotka löytyvät liitteistä E ja F. Näistä suurimmat ja pienimmät jännitteet ovat taulukoitu taulukoihin 4 ja 5.

Taulukko 4. Jännitemittauksen tulokset 11.4.2019 klo 19:10–20:10.

	Min (V)	Max (V)	Erotus (V)
A Vrms	229,7	235,7	6,0
B Vrms	230,8	236,7	5,9
C Vrms	231,5	237,6	6,1

Taulukko 5. Jännitemittauksen tulokset 12.4.2019 klo 16:20–17:20.

	Min (V)	Max (V)	Erotus (V)
A Vrms	230,1	232,5	2,4
B Vrms	231,8	234,1	2,3
C Vrms	231,8	234,3	2,5

Suurimmillaan jännitteet vaihtelivat ajanjaksolla 11.4.2019 klo 19:10–20:10, jona aikana suurimman ja pienimmän jännitteen arvon erotus oli 6,1 V. Liitteestä E voidaan havaita, että jännitteessä tapahtuu ajanhetkellä 19:24 noin 3,5 V jännitetason hyppäys alaspäin.

Jännitetason vaihtelut saavat olla maksimissaan 207–253 V pienjänniteverkossa normaaleissa käyttöolosuhteissa [50]. Nämä mittaustulokset pysyvät hyvin sallituissa rajoissa. Kuitenkin 6 V erotus pienimmän ja suurimman jännitteen arvolla välillä tunnin aikajaksolla on hyvä huomioida mitattaessa sähköauton latausta. Tämä tullaan huomioimaan mittausvirheenä, joka pyritään minimoimaan niin, että lähtöjännitteen arvo tarkastetaan ennen sähköauton kytkemistä lataukseen jokaisen mittauksen kohdalta erikseen.

Edellä mainituille ajanjaksoille on laskettu myös sekunnin sisällä tapahtuvat jännitevaihtelut vähentämällä jokaisen sekunnin jännitteen maksimiarvosta jännitteen minimiarvo. Sekunnin sisäiset jännitevaihtelut ovat keskimäärin 0,2 V kaikilla ajanjaksoilla jokaisen vaihejännitteen kohdalla.

MITTAUS 2: Jännitehäviömittaus

Jännitehäviömittaus on toteutettu yhdelle vaiheelle, koska latausasema on yksivaiheinen. Taulukossa 6 on esitetty mittauksen tulokset.

Taulukko 6. Jännitehäviömittausten tuloksena määritetyt impedanssit.

	Nollaimpedanssi (Ω)	Vaiheimpedanssi (Ω)
Vaihe A	0,28+j0,005	0,29-j0,04

Mittaustuloksista huomataan reaktanssien olevan vähäisiä ja ne voidaan approksimoida nolllaksi.

MITTAUS 3: Oikosulkumittaus

Oikosulkumittaus tehtiin yksivaiheisena kaikille kolmelle vaiheelle erikseen. Taulukossa 7 on tulokset nollaimpedanssille ja vaiheimpedansseille.

Taulukko 7. Oikosulkukokeen tulokset.

	Nollaimpedanssi (Ω)	Vaiheimpedanssi (Ω)
Vaihe A	0,19+j0,005	0,21-j0,01
Vaihe B	0,18+j0,005	0,21-j0,13
Vaihe C	0,19+j0,005	0,20+j0,19

Tuloksista huomataan impedanssien olevan lähes samoja jokaisen vaiheen kohdalla, mikä tarkoittaa järjestelmän olevan lähes symmetrinen.

MITTAUS 4: Säätvastuksen impedanssi

Säätvastuksen impedanssien mittauksen tulokset ovat esitetty taulukoissa 8 ja 9.

Taulukko 8. Säätvastuksen resistanssit.

Säätvastuksen asento	R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	R_N (Ω)
0	0,01	0,01	0,01	0,04
1	0,36	0,37	0,40	0,40
2	0,72	0,72	0,72	0,94
3	1,76	1,73	1,98	2,00

Taulukko 9. Säätvastuksen induktanssit.

Säätvastuksen asento	L_A (μH)	L_B (μH)	L_C (μH)	L_N (μH)
0	1,4	5,5	1,4	1,5
1	8,6	8,5	8,8	9,2
2	13,7	13,8	13,8	16,4
3	30,4	30,5	29,2	32,0

Taulukossa 10 on laskettu taulukon 9 arvoista kaavaa 44 käyttäen säätvastukselle reaktanssien arvot.

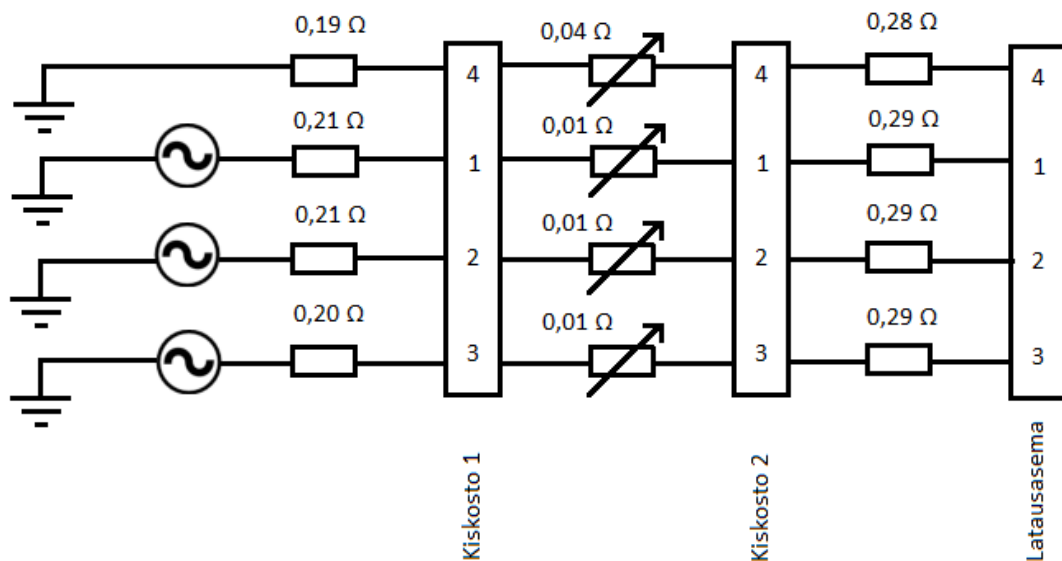
Taulukko 10. Säätvastuksen reaktanssit.

Säätvastuksen asento	x_A (m Ω)	x_B (m Ω)	x_C (m Ω)	x_N (m Ω)
0	0,4	1,7	0,4	0,5
1	2,7	2,7	2,8	2,9
2	4,3	4,3	4,3	5,2
3	9,6	9,6	9,2	10,1

Reaktanssien arvot ovat hyvin vähäisiä, joten ne voidaan approksimoida nolllaksi mallintaessa laboratorion verkkoa.

5.3 Laboratorion verkon mallintaminen OpenDSS-ohjelmassa ja mallin verifiointi mittauksella

Laboratorion mittausten jälkeen tehdään OpenDSS-laskentaohjelmalla malli laboratorion verkolle. Tässä malli rakennetaan luvun 5.2 mittausten pohjalta. Kuva 23 havainnollistaa verkkoa, joka mallinnetaan. Kuvassa säätvastus on asennossa 0.



Kuva 23. OpenDSS:llä mallinnettava verkon osa.

Aluksi määritetään kolme yksivaiheista jännitelähdettä, joiden vaihejännitteet ovat 230 V. Tämän jälkeen määritetään johtimet ja niiden impedanssit. Säätvastuksen impedanssia muutetaan aina tilanteen mukaan.

OpenDSS-ohjelmalla muodostettu laboratorion malli verifioidaan mittauksella, jossa latausasemaan lisätään vaiheen 1 ja nolllajohtimen välille kaksi 26 Ω vastusta rinnakkain. Tämä mallinnetaan OpenDSS-ohjelmassa vakioimpedanssikuormana. Säätvastus on

asennossa 0. Mittauksen jälkeen katsotaan vastaako OpenDSS:n malli mitattuja tuloksia. Verifiointin tulokset ovat esitetty taulukossa 11.

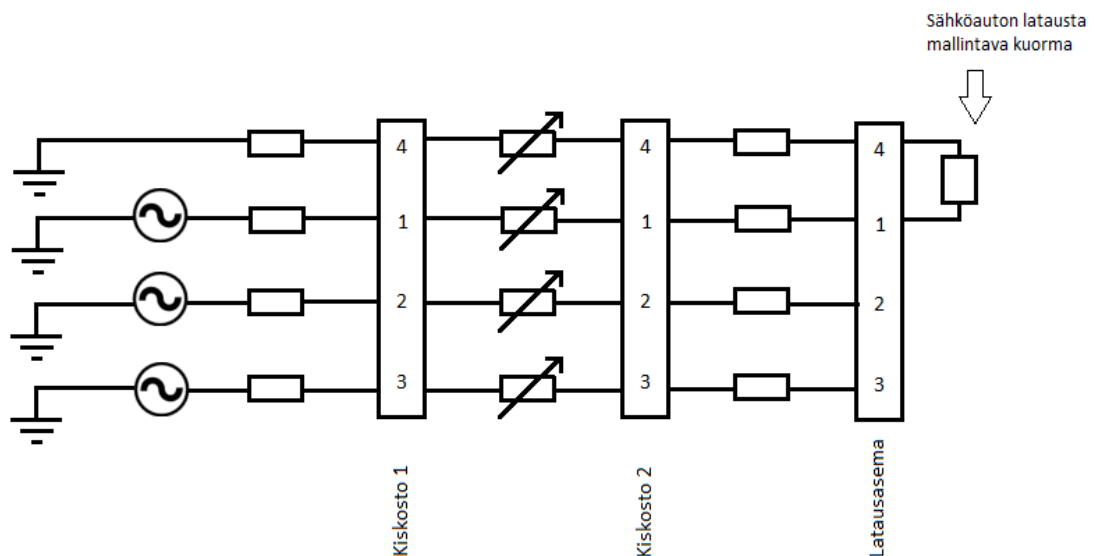
Taulukko 11. Verifiointin tulokset.

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	224,71±0,0	225,67±0,0	3,87±0,0	3,29±1,36
Latausasemalla	215,10±0,0	216,91±0,0	8,59±0,0	7,57±1,64

Verifiointin osalta sekä lasketut että mitatut tulokset näyttävät olevan lähes samoja. Mitattujen ja laskettujen arvojen ero on noin 1–2 V. Vaikka lähtöjännite on otettu huomioon, voi esimerkiksi jännitteen vaihtelu aiheuttaa 1 V eron tuloksiin. Tämä johtuu mittauksessa 1 havaittuun jännitteen käyttäytymiseen, jolloin jo lyhyessä ajassa jännite voi muuttua 1 V verran ja olla yksi syy virheelle. Tarkemmin tulosten eroa käsitellään sähköautojen mittausten yhteydessä.

5.4 Sähköauton latauksen mallintaminen

Tässä luvussa lasketaan ensin OpenDSS mallin avulla hypoteesit vaihejännitteelle ja nollajännitteelle, kun sähköauton lataus liitetään mallinnettuun verkkoon (kuva 24). Tämän jälkeen mitataan sama tilanne laboratorioissa ja katsotaan pitävätkö hypoteesit paikkaansa.



Kuva 24. Verkon malli, kun sähköauton latauksen kuorman malli on lisätty.

Tarkoituksena on mitata 7 eri tilannetta, joissa erona on säätövastuksen asento. Säätövastuksen asennot eri tilanteissa on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Säätvastuksen asennot sähköauton latauksen mittauksessa.

Tilanne	Säätvastuksen asento		Säätvastuksen sum- maresistanssi (Ω)
	Nolla	Vaihe	
Tilanne 1	-	-	0
Tilanne 2	0	0	0,05
Tilanne 3	0	1	0,40
Tilanne 4	1	1	0,76
Tilanne 5	1	2	1,12
Tilanne 6	0	2	0,76
Tilanne 7	2	2	1,66

Ideana on muuttaa säätvastuksen asentoa, jolloin syöttävän verkon impedanssi muuttuu. Ensimmäisessä tilanteessa säätvastus on ohitettu, ja muissa tilanteissa säätvastus on kytketty käyttäen säätvastuksen asentoja 0–2. Jännite normaaleissa käyttöolosuhteissa saattaa vaihdella välillä $230\text{ V} \pm 10\%$, joten muuttamalla säätvastuksen arvoja päästään lähelle alarajaa. Tästä ei kuitenkaan enää lasketa jännitettä paljoa alemmas, koska sellaisia tilanteita ei pitäisi verkossa syntyä.

5.4.1 OpenDSS-malli

OpenDSS-mallin avulla lasketaan hypoteesit eli mitä oletetaan mittaustuloksiksi sähköauton latauksen liittämisessä laboratorion sähköverkkoon. Tällöin sähköverkon malliin lisätään sähköauton latausta mallintava kuorma vaiheen 1 ja nollajohtimen välille kuvan 24 mukaisesti. Sähköauton lataus mallinnetaan yksivaiheisena kuormana, koska lataus toteutetaan yksivaiheisella latauksella. Kuorma oletetaan vakiovirtakuormaksi (16 A). Säätvastuksen arvoa muutetaan taulukon 12 mukaisesti.

Taulukossa 13 on esitetty OpenDSS mallilla saadut tulokset yksivaiheiselle sähköauton lataukselle kiskoston sekä latausaseman kohdalta käyttäen taulukon 12 säätvastuksien asentoja.

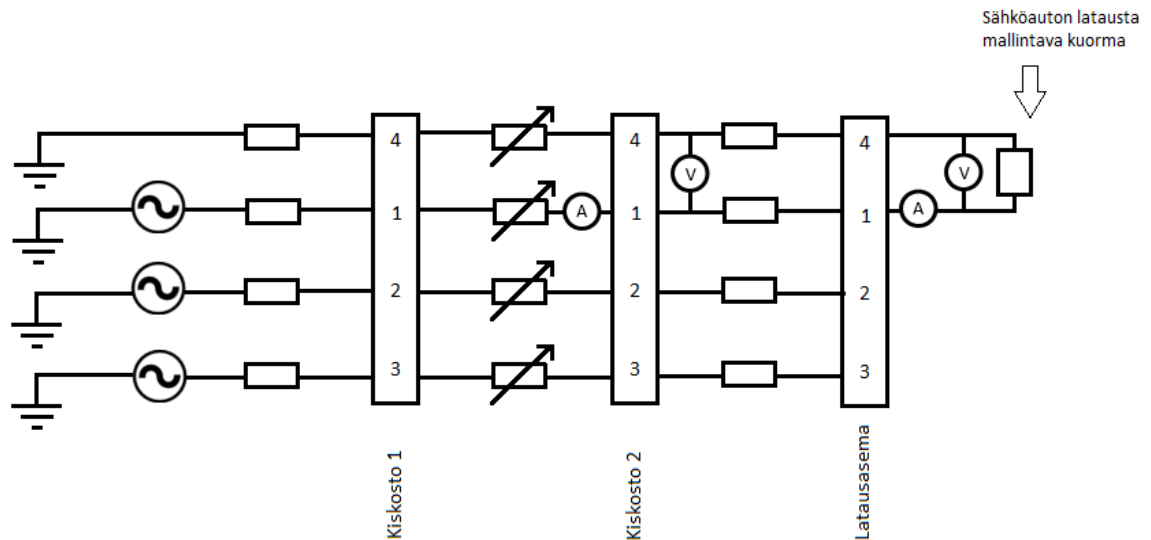
Taulukko 13. Hypoteesi sähköauton lataukselle.

		Vaihejännite (V)	Nollajännite (V)
Tilanne 1	Kiskostossa 2	223,7±0,0	3,0±0,0
	Latausasemalla	214,7±0,0	7,4±0,0
Tilanne 2	Kiskostossa 2	222,9±0,0	3,6±0,0
	Latausasemalla	214,0±0,0	8,0±0,0
Tilanne 3	Kiskostossa 2	217,8±0,0	3,5±0,0
	Latausasemalla	209,1±0,0	7,8±0,0
Tilanne 4	Kiskostossa 2	212,7±0,0	8,8±0,0
	Latausasemalla	204,2±0,0	13,0±0,0
Tilanne 5	Kiskostossa 2	207,9±0,0	8,6±0,0
	Latausasemalla	199,6±0,0	12,7±0,0
Tilanne 6	Kiskostossa 2	212,7±0,0	3,4±0,0
	Latausasemalla	204,2±0,0	7,6±0,0
Tilanne 7	Kiskostossa 2	201,0±0,0	15,9±0,0
	Latausasemalla	193,1±0,0	19,8±0,0

Taulukon 13 mukaan vaihejännitteen A oletetaan laskevan ensimmäisessä tilanteessa noin 6,7 %, toisessa 7,0 %, kolmannessa 9,1 %, neljännessä 11,2 %, viidennessä 13,2 %, kuudennessa 11,2 % ja seitsemännessä 16,1 % latausaseman ja jännitelähteen (230 V) välillä.

5.4.2 Verifiointi mittauksilla, Nissan Leaf

Luvussa 5.4.1 esitetyt hypoteesit sähköauton latauksen aiheuttamalle kuormalle on tarkoitus todentaa tässä luvussa mittauksilla. Mittaukset toteutetaan mittaamalla jännitettä ja virtaa kohdista kiskosto 2 ja latausasema (kuva 25), kun sähköauto on kytketty latauskaapelilla latausasemaan. Jännite mitataan vaihejohtimen ja nollajohtimen väliltä sekä nollajohtimen ja suojajohtimen väliltä. Koska lataus toteutetaan yksivaiheisena, mitataan vain vaiheen A jännitettä ja virtaa.



Kuva 25. Sähköauton latauksen mittaus.

Mittauksissa lisätään syöttävän verkon impedanssia säätövastuksen asentoa muuttamalla. Nämä eri tilanteet ovat merkattu taulukkoon 12. Mittaukset suoritetaan jokaiselle tilanteelle erikseen kytkemällä sähköauto latauksesta irti aina ennen säätövastuksen asennon muuttamista. Näin saadaan selville vaihejännitteen arvo ennen jokaista mittausta.

Ensimmäisenä mittaukset tehdään Nissan Leaf -sähköautolle. Taulukoissa 14 ja 15 on esitetty tilanteiden 1 ja 2 mittaustulokset ja OpenDSS-ohjelmalla lasketut arvot.

Taulukko 14. Tilanteen 1 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	222,5±0,0	226,0±0,0	3,1±0,0	3,1±4,3
Latausasemalla	216,3±0,0	217,4±0,0	7,6±0,0	7,3±4,9

Taulukko 15. Tilanteen 2 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	225,6±0,0	226,9±0,0	3,7±0,0	3,1±4,5
Latausasemalla	216,4±0,0	218,2±0,0	8,2±0,0	7,4±5,01

Taulukoista 14 ja 15 voidaan havaita, että säätövastuksen ohikytkeminen ja säätövastuksen asennon laittaminen asentoon 0 eivät juurikaan eroa toisistaan mittaustulosten

osalta. Tästä syystä seuraaville sähköautoille toistetaan vain tilanteet 2–7. Taulukossa 16–20 on tilanteiden 3, 4, 5, 6 ja 7 tulokset ja lasketut arvot.

Taulukko 16. *Tilanteen 3 mittauksen tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	220,3±0,0	220,9±0,0	3,6±0,0	3,1±4,4
Latausasemalla	211,3±0,0	212,3±0,0	8,0±0,0	7,4±4,8

Taulukko 17. *Tilanteen 4 mittauksen tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	215,3±0,0	215,2±0,0	9,1±0,0	8,9±5,0
Latausasemalla	206,5±0,0	206,5±0,0	13,2±0,0	13,2±5,1

Taulukko 18. *Tilanteen 5 mittauksen tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	210,2±0,0	209,2±0,0	8,8±0,0	8,9±4,9
Latausasemalla	201,7±0,0	200,6±0,0	13,0±0,0	13,1±5,0

Taulukko 19. *Tilanteen 6 mittauksen tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	214,6±0,0	214,7±0,0	3,5±0,0	3,2±4,1
Latausasemalla	206,0±0,0	206,1±0,0	7,8±0,0	7,4±4,6

Taulukko 20. *Tilanteen 7 mittauksen tulokset ja lasketut arvot (Nissan Leaf).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	202,8±0,0	203,0±0,0	16,2±0,0	14,7±4,9
Latausasemalla	194,6±0,0	194,3±0,0	20,2±0,0	18,9±5,0

Tässä luvussa OpenDSS-ohjelmalla on laskettu arvot uudestaan ja ne eroavat hieman luvun 5.4.1 hypoteesilaskelmista. Tämä johtuu siitä, että hypoteesilaskuissa käytettiin vaihejännitteelle arvoa 230 V. Todellisuudessa se kuitenkin vaihtelee hieman koko ajan, mikä todettiin laboratoriomittauksessa 1. Tästä syystä näissä tuloksissa OpenDSS-ohjelmalla lasketut arvot ovat laskettu uudestaan käyttäen tarkempia arvoja jokaiselle tilanteelle. Lisäksi mitattu virta vaihteli välillä 16,2–16,3 ja tätä arvoa käytettiin vakiovirtakuor-mamallin virtarajana.

Mitatut arvot ovat esitetty keskiarvoina yhden minuutin aikaisista mitatuista tuloksista, kun mittaus on ollut sekunnin välein. Mittaus- ja laskentatulosten välistä eroavaisuutta tarkasteltaessa käytetään jokaisen sekunnin ja OpenDSS-ohjelman tuloksen erojen keskiarvoa. Mallinrusvirhettä on tarkasteltu taulukossa 21 kiskoston 2 ja taulukossa 22 latausaseman kohdalta. Taulukossa 21 toinen sarake kuvaa kiskoston 2 vaihejännitteen mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tuloksen erojen keskiarvoa jokaiselle tilanteelle. Kolmannessa sarakkeessa on sarakkeen kaksi eron suhteellinen muutos verrattuna OpenDSS-ohjelman arvoon. Vastaavasti menevät sarakkeet neljä ja viisi nollajännitteen osalta. Taulukossa 22 esitetään vastaavasti tulokset koskien latausaseman liityntäpistettä.

Taulukko 21. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot kiskostossa 2 (Nissan Leaf).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	+0,54	+0,24	-0,01	-0,24
Tilanne 2	+1,26	+0,56	-0,56	-15,20
Tilanne 3	+0,63	+0,29	-0,48	-13,13
Tilanne 4	-0,08	-0,04	-0,14	-1,52
Tilanne 5	-0,93	-0,44	+0,13	+1,47
Tilanne 6	+0,06	+0,03	-0,30	-8,50
Tilanne 7	+0,18	+0,09	-1,51	-9,30

Taulukko 22. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot latausasemalla (Nissan Leaf).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	+1,14	+0,53	-0,31	-4,09
Tilanne 2	+1,83	+0,84	-0,87	-10,52
Tilanne 3	+0,95	+0,45	-0,64	-8,02
Tilanne 4	+0,01	+0,00	-0,20	-1,51
Tilanne 5	-1,11	-0,55	+0,20	+1,53
Tilanne 6	+0,11	+0,05	-0,33	-4,27
Tilanne 7	-0,30	-0,15	-1,26	-6,26

Erot mitattujen ja OpenDSS-ohjelmalla saatujen vaihejännitteiden tuloksien välillä ovat alle 2 V. Niitä voidaan selittää seuraavilla syillä. OpenDSS-ohjelman verkon malli on rakennettu mittaustuloksista, joihin sisältyy mittausvirhettä. Lisäksi laskennan lähtöjännite on mittausten perusteella saatu arvio ja se voi hieman vaihdella mittauksen aikana, koska niin kuin todettiin aikaisemmin jännitemittauksen tuloksista, jännite vaihtelee lyhyelläkin aikavälillä. Mittalaitteen, Dranetzin, tarkkuus on $\pm 0,1\%$ mittarin lukemasta [55].

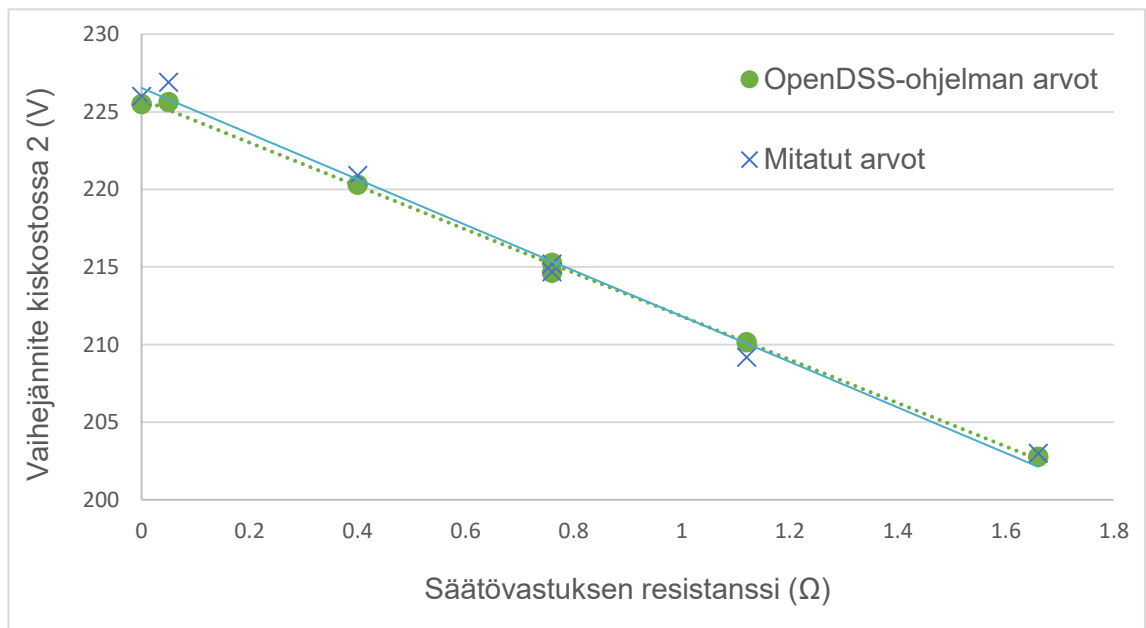
Nollajännitteen osalta eroja voidaan selittää myös edellä mainituilla syillä. Erojen arvot ovat samaa suuruusluokkaa vaihejännitteen kanssa, mutta suhteellisten erojen osalta muutokset ovat suuremmat etenkin tilanteen 2 ja 3 osalta. Tämä johtuu siitä, että vertailujännite on nyt huomattavasti pienempi, joten suhteellisten virheiden arvot kasvavat.

Taulukkoon 23 on koottu vaihejännitteet eri säätövastuksen arvoilla.

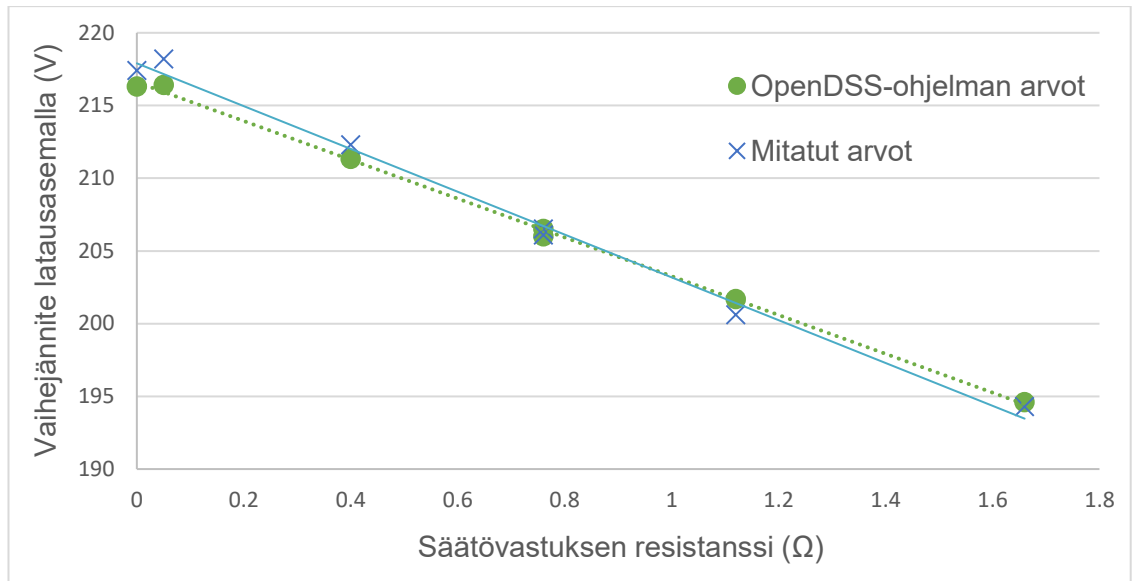
Taulukko 23. Säätvastuksen vaikutus vaihejännitteeseen (Nissan Leaf).

Tilanne	Säätvastuksen summaresis- tanssi (Ω)	Vaihejännite kiskostossa 2 (V)		Vaihejännite latausase- malla (V)	
		OpenDSS	Mitattu	OpenDSS	Mitattu
Tilanne 1	0	225,5	226,0	216,3	217,4
Tilanne 2	0,05	225,6	226,9	216,4	218,2
Tilanne 3	0,40	220,3	220,9	211,3	212,3
Tilanne 4	0,76	215,3	215,2	206,5	206,5
Tilanne 5	1,12	210,2	209,2	201,7	200,6
Tilanne 6	0,76	214,6	214,7	206,0	206,1
Tilanne 7	1,66	202,8	203,0	194,6	194,3

Kuvat 26 ja 27 on tehty taulukosta 23 ja niistä näkyy tarkemmin, miten jännite käyttäytyy säätvastusta säädettäessä. Kuvissa pisteiviiva kuvaa OpenDSS-ohjelman arvoista sovitettua suoraa ja viiva mitatuista arvoista sovitettua suoraa.

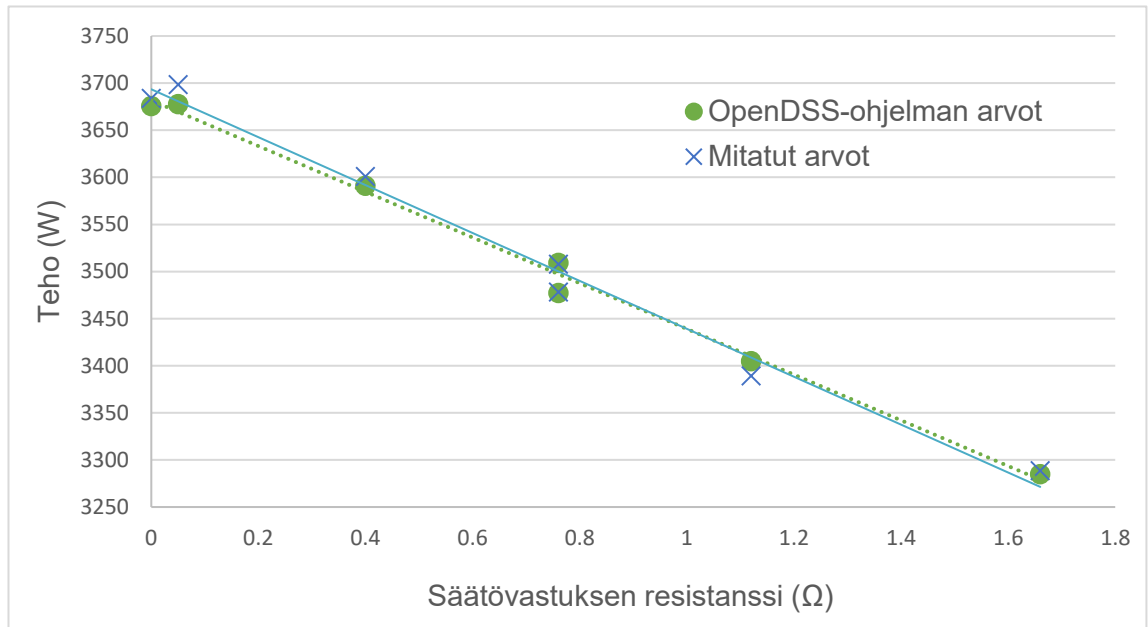


Kuva 26. Jänniteriippuvuus säätvastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (Nissan Leaf)

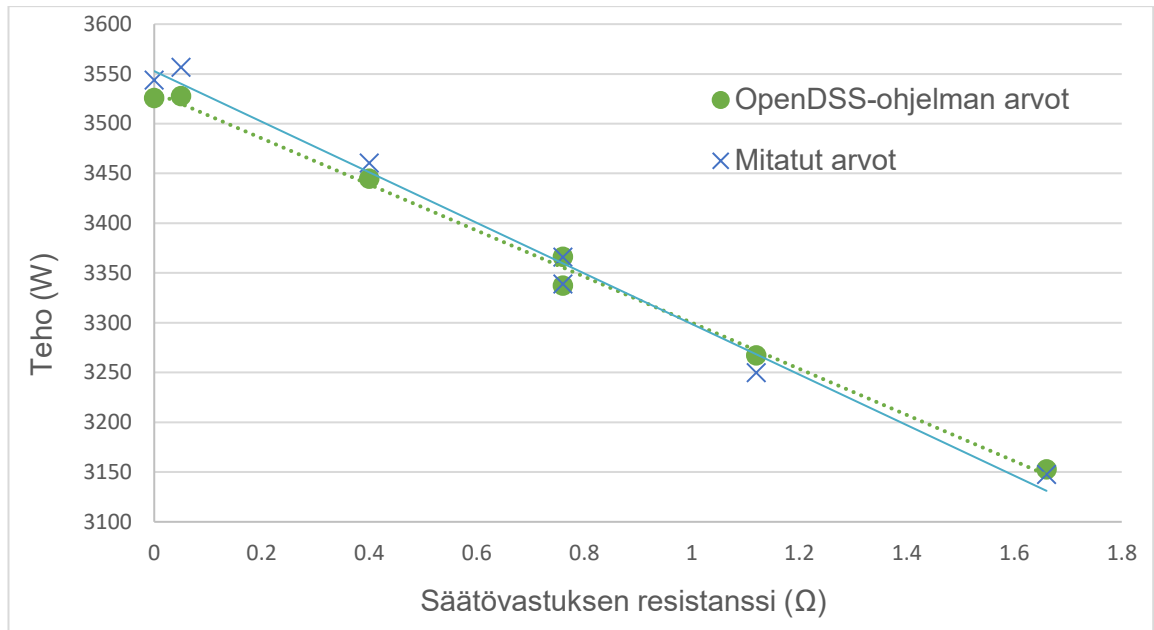


Kuva 27. Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (Nissan Leaf)

Kuvista 26 ja 27 voidaan havaita jännitteen laskevan lähes lineaarisesti säätövastusta lisättäessä. Mittauksissa mitattiin myös virtaa ja se pysyi kaikissa mittauksissa lähes vakiona, välillä 16,2–16,3 A, eli silloin myös teho riippuu verkon resistanssista. Tätä kuvaavat kuvat 28 ja 29, joissa on laskettu virroista ja jännitteistä teho jokaisessa tilanteessa kiskoston 2 kohdalla sekä latausaseman kohdalla.



Kuva 28. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (Nissan Leaf)



Kuva 29. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (Nissan Leaf)

Kuvien 28 ja 29 mukaan myös teho on riippuvainen resistanssista.

5.4.3 Verifiointi mittauksilla, Hyundai Ioniq Plug-in

Tässä luvussa tehdään vastaavanlainen mittaus autolle Hyundai Ioniq Plug-in kuin luvussa 5.4.2. Mittausjärjestely on muuten sama, mutta latausaseman tilalla on Schuko-pistorasia. Eli lataus tapahtuu lataustavan 2 mukaan käyttäen Schuko-pistorasiaa, jolloin latausvirta on pienempi kuin Nissan Leafin tapauksessa.

Lisäksi säätövastukselle annetaan hieman eri asennot, jotka ovat esitetty taulukossa 24. Koska lataus tapahtuu Schuko-pistorasiasta, on virta ja siten myös jännitteenalenema pienempi, joten tähän mittaukseen on otettu mukaan myös säätövastuksen asento 3.

Taulukko 24. *Säätövastuksen asennot autolle Hyundai Ioniq Plug-in.*

Tilanne	Säätövastuksen asento		Säätövastuksen sum- maresistanssi (Ω)
	Nolla	Vaihe	
Tilanne 1	0	0	0,05
Tilanne 2	0	1	0,40
Tilanne 3	1	1	0,76
Tilanne 4	1	2	1,12
Tilanne 5	2	2	1,66
Tilanne 6	0	2	0,76
Tilanne 7	0	3	1,80

Taulukoissa 25–31 on esitetty mittausten tulokset sekä OpenDSS-ohjelmalla lasketut arvot.

Taulukko 25. *Tilanteen 1 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	227,2 \pm 0,0	227,0 \pm 0,0	2,7 \pm 0,0	2,3 \pm 4,6
Latausasemalla	220,4 \pm 0,0	220,4 \pm 0,0	6,1 \pm 0,0	5,5 \pm 6,2

Taulukko 26. *Tilanteen 2 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	222,4 \pm 0,0	223,4 \pm 0,0	2,7 \pm 0,0	2,3 \pm 4,7
Latausasemalla	215,7 \pm 0,0	216,8 \pm 0,0	6,0 \pm 0,0	5,5 \pm 6,1

Taulukko 27. *Tilanteen 3 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	218,4 \pm 0,0	219,2 \pm 0,0	6,8 \pm 0,0	6,4 \pm 6,5
Latausasemalla	211,9 \pm 0,0	212,6 \pm 0,0	10,0 \pm 0,0	9,6 \pm 6,6

Taulukko 28. *Tilanteen 4 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	214,9±0,0	215,4±0,0	6,7±0,0	6,4±6,0
Latausasemalla	208,4±0,0	208,9±0,0	9,9±0,0	9,6±6,2

Taulukko 29. *Tilanteen 5 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	209,3±0,0	211,5±0,0	12,4±0,0	10,5±6,0
Latausasemalla	203,0±0,0	205,2±0,0	15,5±0,0	13,7±6,1

Taulukko 30. *Tilanteen 6 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	219,7±0,0	219,5±0,0	2,66±0,0	2,3±4,4
Latausasemalla	213,0±0,0	213,1±0,0	5,91±0,0	5,5±5,6

Taulukko 31. *Tilanteen 7 mittausten tulokset ja lasketut arvot (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	208,9±0,0	208,7±0,0	2,5±0,0	2,3±4,0
Latausasemalla	202,7±0,0	202,2±0,0	5,6±0,0	5,5±5,3

Taulukoissa 32 ja 33 on laskettu mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot vastaavalla tavalla kuin Nissan Leafin tapauksessa.

Taulukko 32. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot kiskostossa 2 (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	-0,18	-0,08	-0,42	-15,27
Tilanne 2	+0,96	+0,43	-0,40	-14,96
Tilanne 3	+0,75	+0,34	-0,38	-5,59
Tilanne 4	+0,48	+0,22	-0,27	-4,11
Tilanne 5	+2,23	+1,06	-1,91	-15,38
Tilanne 6	-0,11	-0,05	-0,32	-12,07
Tilanne 7	-0,23	-0,11	-0,20	-7,96

Taulukko 33. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot latausasemalla (Hyundai Ioniq Plug-in).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	+0,00	+0,00	-0,55	-9,04
Tilanne 2	+1,12	+0,52	-0,50	-8,34
Tilanne 3	+0,78	+0,37	-0,40	-4,04
Tilanne 4	+0,46	+0,22	+0,00	+0,02
Tilanne 5	+2,19	+1,08	-1,82	-11,71
Tilanne 6	+0,09	+0,04	-0,39	-6,58
Tilanne 7	-0,44	-0,22	-0,09	-1,61

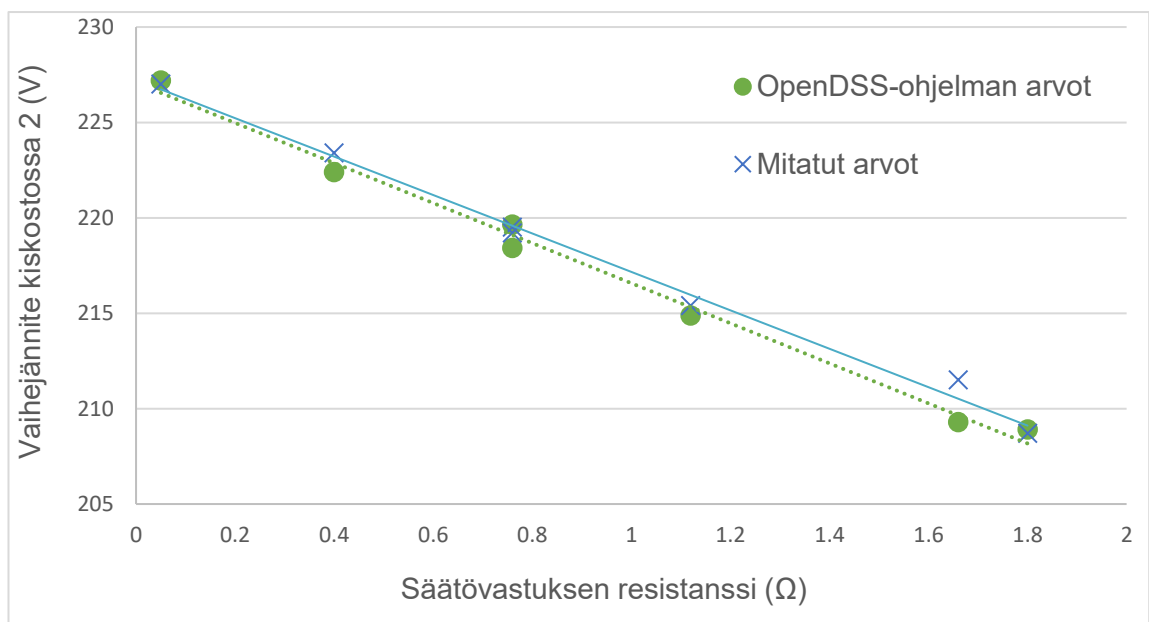
Taulukoiden 32 ja 33 mukaan erot OpenDSS-ohjelman tuloksien ja mitattujen tuloksien välillä ovat suurimmillaan 2,23 V, mutta pääsääntöisesti kuitenkin pienempiä. Erot ovat samaa suuruusluokkaa kuin Nissan Leafin mittauksien osalta, joten niiden yhteydessä käsitellyt syyt pätevät myös näihin tuloksiin.

Taulukossa 34 on esitetty säätövastuksen vaikutus jännitteeseen.

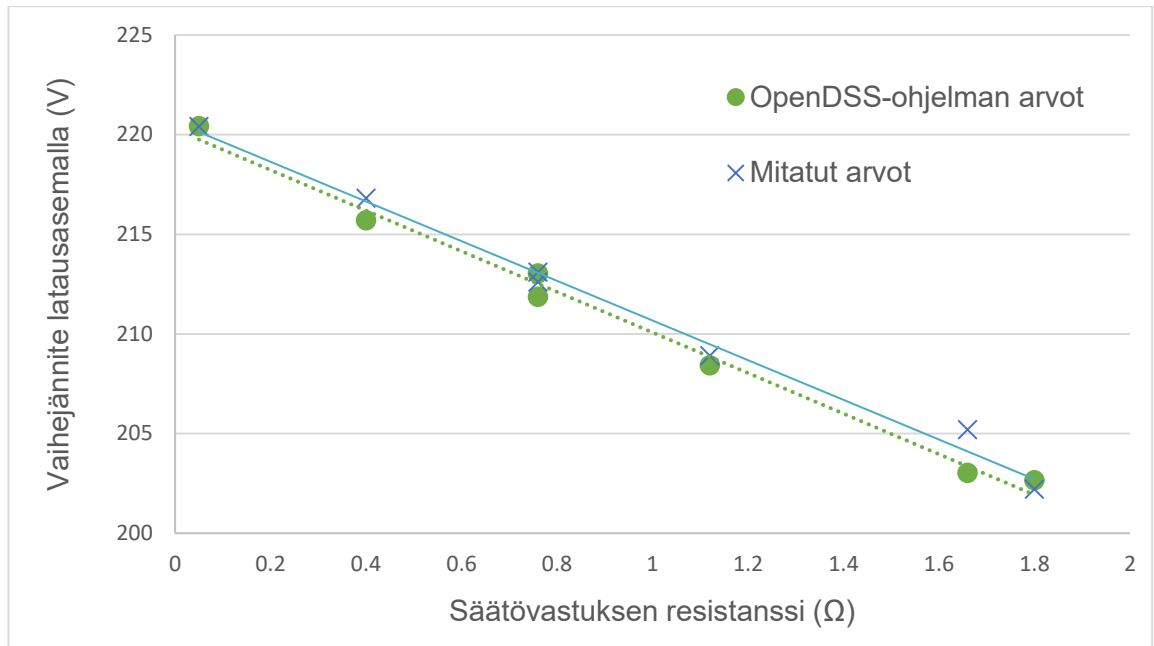
Taulukko 34. Säätoavastuksen vaikutus vaihejännitteeseen (Hyundai Ioniq Plug-in).

Tilanne	Säätoavastuksen summaresistanssi (Ω)	Vaihejännite kiskostossa 2 (V)		Vaihejännite latausasemalla (V)	
		OpenDSS	Mitattu	OpenDSS	Mitattu
Tilanne 1	0,05	227,2	227,0	220,4	220,4
Tilanne 2	0,40	222,4	223,4	215,7	216,8
Tilanne 3	0,76	218,4	219,2	211,9	212,6
Tilanne 4	1,12	214,9	215,4	208,4	208,9
Tilanne 5	1,66	209,3	211,5	203,0	205,2
Tilanne 6	0,76	219,7	219,5	213,0	213,1
Tilanne 7	1,80	208,9	208,7	202,7	202,2

Taulukosta 35 on tehty kuvat 30 ja 31, jotka kuvaavat jännitteen käyttäytymistä säätoavastusta säädettäessä. Kuvissa pisteiviiva kuvaa OpenDSS-ohjelman arvoista sovitettua suoraa ja viiva mitatuista arvoista sovitettua suoraa.

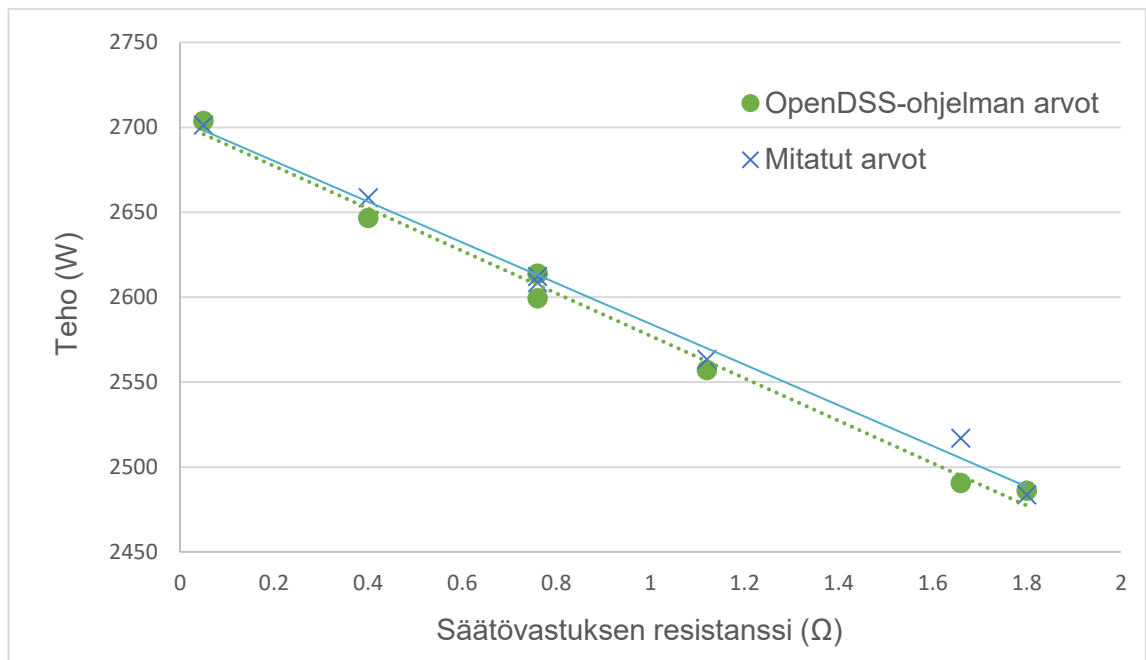


Kuva 30. Jänniteriippuvuus säätoavastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).

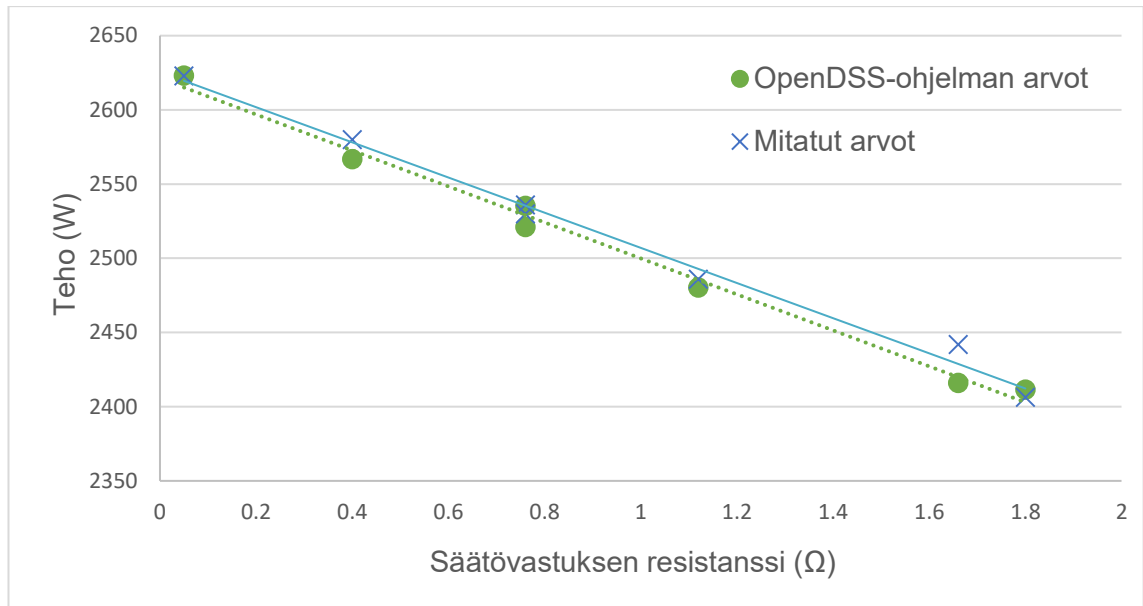


Kuva 31. Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).

Samoin kuin Nissan Leafin kohdalla, myös näistä kuvista 30 ja 31 voidaan havaita jännitteen laskevan lähes lineaarisesti säätövastusta lisättäessä. Hyundai Ioniq Plug-in -auton mittauksessa virta pysyi koko ajan lähes vakiona, 11,9 A. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty tehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista.



Kuva 32. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).



Kuva 33. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla (Hyundai Ioniq Plug-in).

Samoin kuin Nissan Leafin mittauksissa, myös kuvista 32 ja 33 voidaan havaita tehon olevan lähes lineaarisesti riippuva säätövastuksen resistanssista.

5.4.4 Verifiointi mittauksilla, BMW i3

Verifiointi BMW i3 sähköauton mittauksilla tapahtuu vastaavasti kuin Nissan Leafilla. Eli käytössä on latausasema ja lataus tapahtuu yksivaiheisena latauksena. Säätövastuksen asennot (taulukko 35) ovat myös vastaavasti, mutta säätövastuksen ohikytkeminen on jätetty mittaamatta.

Taulukko 35. Säätövastuksen asennot autolle BMW i3.

Tilanne	Säätövastuksen asento		Säätövastuksen summaresistanssi (Ω)
	Nolla	Vaihe	
Tilanne 1	0	0	0,05
Tilanne 2	0	1	0,40
Tilanne 3	1	1	0,76
Tilanne 4	1	2	1,12
Tilanne 5	2	2	1,66
Tilanne 6	0	2	0,76

Taulukkoihin 36–41 on koottu tulokset mitatuista arvoista sekä OpenDSS-ohjelman arvoista.

Taulukko 36. *Tilanteen 1 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	226,0 \angle 0	227,2 \angle 0	3,8 \angle 0	3,1 \angle 4,7
Latausasemalla	216,7 \angle 0	219,0 \angle 0	8,3 \angle 0	7,2 \angle 5,3

Taulukko 37. *Tilanteen 2 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	219,9 \angle 0	220,9 \angle 0	3,7 \angle 0	3,2 \angle 3,5
Latausasemalla	210,8 \angle 0	212,7 \angle 0	8,2 \angle 0	7,2 \angle 3,4

Taulukko 38. *Tilanteen 3 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	215,0 \angle 0	215,4 \angle 0	9,2 \angle 0	8,9 \angle 4,3
Latausasemalla	206,1 \angle 0	207,1 \angle 0	13,6 \angle 0	13,0 \angle 4,3

Taulukko 39. *Tilanteen 4 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	209,8 \angle 0	209,9 \angle 0	8,9 \angle 0	8,9 \angle 4,5
Latausasemalla	201,2 \angle 0	201,7 \angle 0	13,2 \angle 0	12,9 \angle 4,3

Taulukko 40. *Tilanteen 5 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	203,5 \angle 0	204,7 \angle 0	16,5 \angle 0	14,6 \angle 4,2
Latausasemalla	195,2 \angle 0	196,5 \angle 0	20,6 \angle 0	18,7 \angle 4,3

Taulukko 41. *Tilanteen 6 mittausten tulokset ja lasketut arvot (BMW i3).*

	Vaihejännite (OpenDSS) (V)	Vaihejännite (mitattu) (V)	Nollajännite (OpenDSS) (V)	Nollajännite (mitattu) (V)
Kiskostossa 2	215,6±0	216,0±0	3,6±0	3,2±3,3
Latausasemalla	206,7±0	207,8±0	7,9±0	7,2±3,9

Taulukoihin 42 ja 43 on laskettu vastaavalla tavalla kuin Nissan Leafin tapauksessa jännitteiden ero OpenDSS-ohjelman ja mitattujen tulosten välillä.

Taulukko 42. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot kiskostossa 2 (BMW i3).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	+1,15	+0,51	-0,66	-17,50
Tilanne 2	+0,97	+0,44	-0,52	-14,17
Tilanne 3	+0,40	+0,19	-0,30	-3,22
Tilanne 4	+0,10	+0,05	-0,06	-0,66
Tilanne 5	+1,22	+0,60	-1,92	-11,61
Tilanne 6	+0,40	+0,18	-0,40	-11,06

Taulukko 43. *Mittaustulosten ja OpenDSS-ohjelman tulosten väliset erot latausasemalla (BMW i3).*

	Vaihejännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)	Nollajännitteen ero (V)	Suhteellinen muutos (%)
Tilanne 1	+2,28	+1,05	-1,13	-13,66
Tilanne 2	+1,88	+0,89	-0,94	-11,58
Tilanne 3	+1,06	+0,52	-0,17	-1,27
Tilanne 4	+0,55	+0,27	-0,24	-1,86
Tilanne 5	+1,37	+0,70	-1,96	-9,50
Tilanne 6	+1,09	+0,53	-0,69	-8,66

Taulukoiden 42 ja 43 mukaan myös nämä erot mitatuissa ja OpenDSS-ohjelman avulla saaduissa arvoissa ovat samaa suuruusluokkaa edellisten verifiointien kanssa, ja niiden yhteydessä esitetyt virheiden syyt pätevät myös näihin. Kaikista mittauksista suurin ero

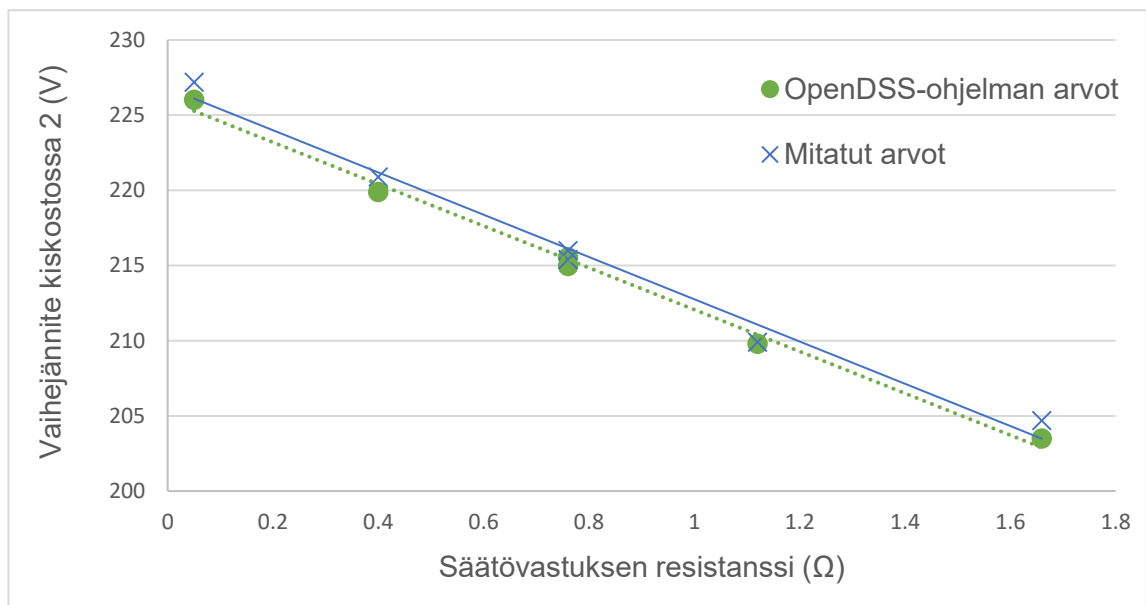
mitattujen ja OpenDSS-ohjelmalla saatujen tulosten välillä on 2,28 V ja pienin 0,00 V (tarkemmin 0,002 V).

Taulukkoon 44 on koottu säätövastuksen vaikutus vaihejännitteeseen.

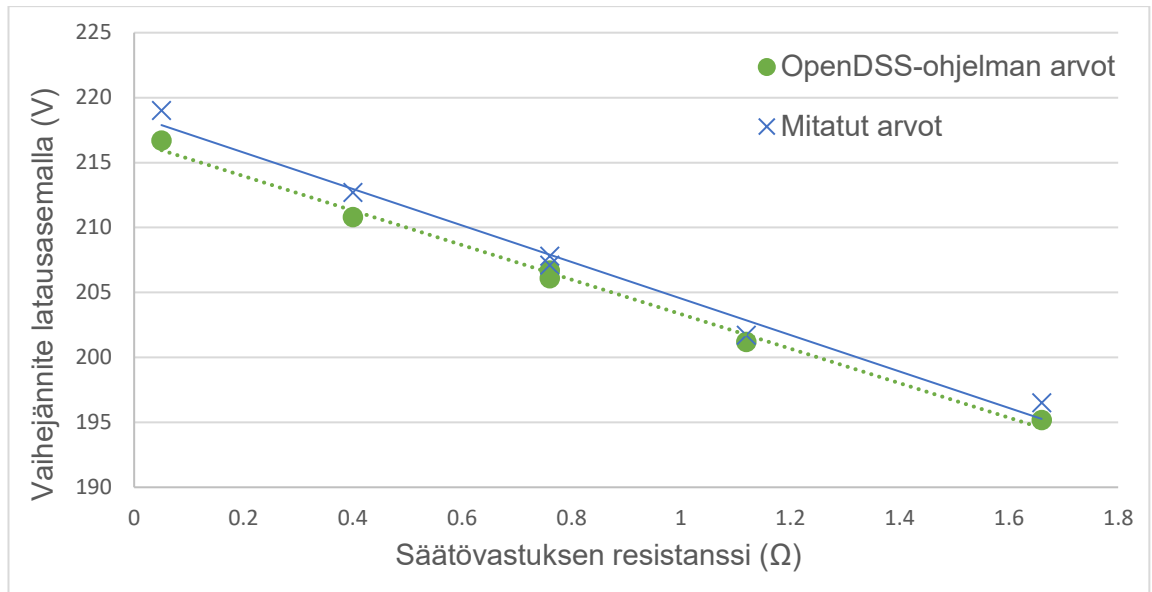
Taulukko 44. *Säätövastuksen vaikutus vaihejännitteeseen (BMW i3).*

Tilanne	Säätövastuksen summaresis- tanssi (Ω)	Vaihejännite kiskostossa 2 (V)		Vaihejännite latausase- malla (V)	
		OpenDSS	Mitattu	OpenDSS	Mitattu
Tilanne 1	0,05	226,0	227,2	216,7	219,0
Tilanne 2	0,40	219,9	220,9	210,8	212,7
Tilanne 3	0,76	215,0	215,4	206,1	207,1
Tilanne 4	1,12	209,8	209,9	201,2	201,7
Tilanne 5	1,66	203,5	204,7	195,2	196,5
Tilanne 6	0,76	215,6	216,0	206,7	207,8

Taulukon pohjalta on tehty kuvat 34 ja 35, jotka kuvaavat säätövastuksen resistanssin vaikutusta jännitteeseen. Kuvissa pisteiviiva kuvaa OpenDSS-ohjelman arvoista sovitettua suoraa ja viiva mitatuista arvoista sovitettua suoraa.

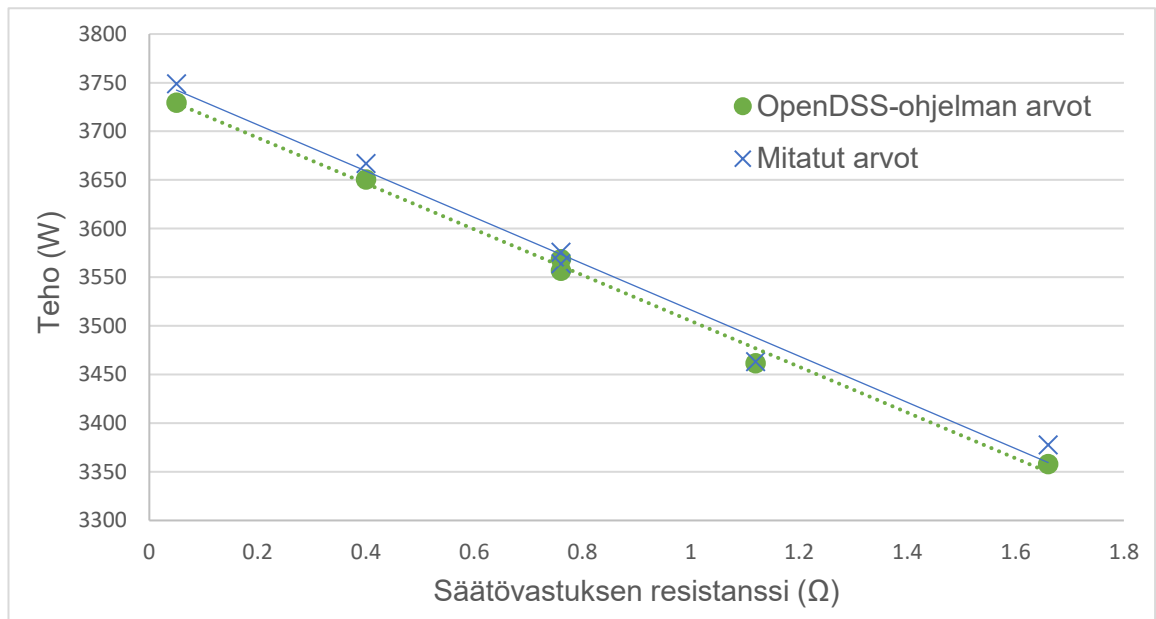


Kuva 34. *Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (BMW i3)*

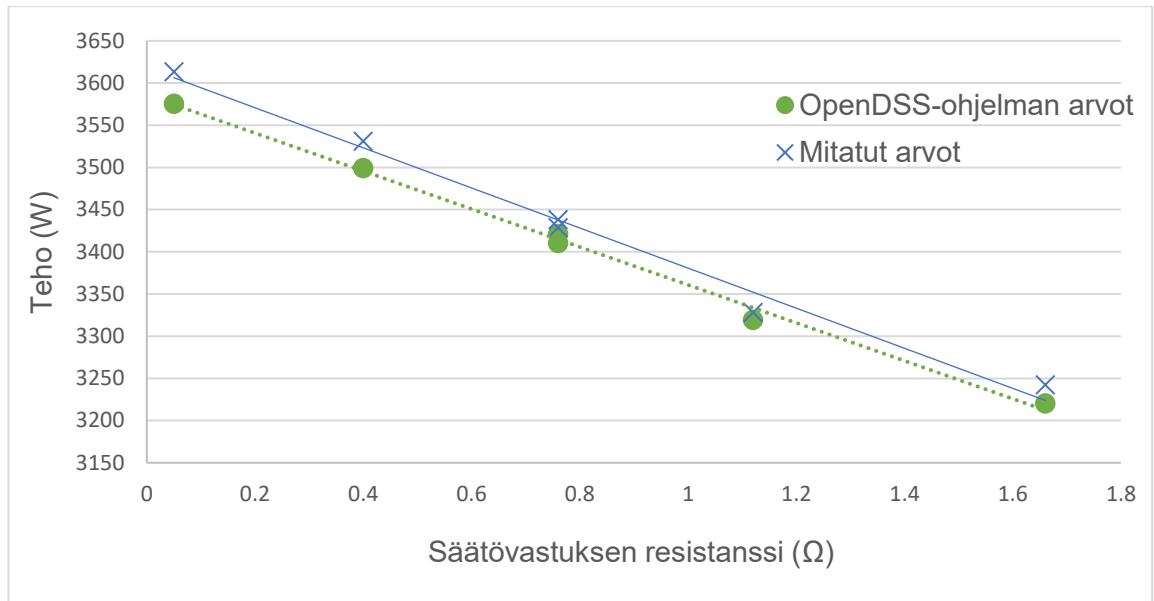


Kuva 35. Jänniteriippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (BMW i3)

Myös kuvien 34 ja 35 pohjalta voidaan sanoa, että säätövastuksen lisääminen vaikuttaa lineaarisesti jännitteeseen. BMW i3 mittauksissa virta pysyi välillä 16,5–16,6 A. Kuvat 36 ja 37 kuvaavat tehon riippuvuutta säätövastuksen resistanssista.



Kuva 36. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista kiskoston 2 kohdalla. (BMW i3)



Kuva 37. Lataustehon riippuvuus säätövastuksen resistanssista latausaseman kohdalla. (BMW i3)

Kuvien 36 ja 37 mukaan myös tässä tapauksessa teho on lähes lineaarisesti riippuvainen säätövastuksen resistanssista. Kaikkien sähköautojen osalta on näkyvissä myös eroavaisuudet OpenDSS-ohjelman arvojen ja mitattujen arvojen välillä kuvissa 26–37. Kuten kuvista huomaa, OpenDSS-ohjelman arvot ovat välillä suurempia ja välillä pienempiä kuin mitatut arvot ja erojen suuruudet ovat samaa suuruusluokkaa kaikissa kuvissa.

6. YHTEENVETO

Suomessa sähköautojen osuus on selkeästi kasvussa, etenkin ladattavien hybridien osalta, joita on huomattavasti enemmän kuin täyssähköautoja. Sähköautojen määrän odotetaan kasvavan myös tulevaisuudessa, mikä johtaa myös latauspisteiden määrän kasvamiseen.

Sähköautojen latauspisteiden liittämässä kiinteistön sähköverkkoon tulee ensin selvittää kiinteistön verkon nykyinen kuormitus. Sen jälkeen saadaan selville, onko mahdollista liittää sähköautojen lataus ennen sähköliittymän koon kasvattamista tai oman sähköliittymän hankkimista latauspisteelle. Lisäksi kuormanhallinnan avulla voidaan saada sähköauton lataus toteutettua ilman liittymän muutoksia.

Sähköautojen muodostama tehontarve kiinteistöön riippuu muun muassa siitä, minkälaista toimintasädettä halutaan saavuttaa tietyssä ajassa. Myös esimerkiksi lataustapa vaikuttaa tehoon. Tällä hetkellä yksivaiheinen lataustapa on suosituin, mutta mitoituksia suunniteltaessa kiinteistön verkkoon on hyvä varautua mahdolliseen tulevaan kolmivaiheiseen lataukseen.

Tässä diplomityössä tavoitteena oli tarkastella OpenDSS-ohjelman soveltuvuutta sähköautojen latauksen mallintamiseen verkon kuormituksena. Työn hypoteesina oli käyttää kuorman mallia, joka on vakiovirtakuormamalli. Työssä käytettiin kolmea eri sähköautoa mittauksissa verifioimaan OpenDSS-ohjelman tuloksia. Nissan Leaf ja BMW i3 sähköautojen mittaukset toteutettiin samanlaisina mittauksina lataustavan 3 mukaan käyttäen yksivaiheista latausta latausasemasta. Hyundai Ioniq Plug-in puolestaan toteutettiin käyttäen lataustapaa 2 ja Schuko-pistorasiaa.

Työssä laskettiin ensin hypoteesilaskelmat Nissan Leaf autolle OpenDSS-ohjelmalla. Nämä tulokset olivat suuntaa antavia, ja niihin sisältyi oletuksia, kuten että jännite on aina aluksi 230 V. Selkeästi parempiin tuloksiin päästiin, kun laskennassa vaihejännitteenä käytettiin ennen jokaista latausmittausta suoritetusta jännitemittauksesta saatua arvoa. Lisäksi latausvirta mitattiin, ja mitattua arvoa käytettiin laskennassa nimellisen arvon sijaan. Tällä mallinnusmenetelmällä OpenDSS-ohjelman malli toimi hyvin sähköauton latauksen kuorman mallintamiseen, eli laskentatulokset vastasivat hyvin mitattuja arvoja.

Verrattaessa mitattuja tuloksia ja OpenDSS-ohjelmalla saatuja tuloksia, voidaan havaita, että tuloksissa on eroja, mutta erot ovat melko vähäisiä. Erot vaihtelivat välillä 0,00–2,28 V. Kaikkien mitattujen sähköautojen osalta tulokset olivat samaa suuruusluokkaa, eikä

niiden välillä voidaan havaita selkeitä eroja lataustavan tai autojen osalta. Mahdollisia virheiden syitä on myös pyritty poistamaan, kuten jännitteen mittaus ennen kaikkia latausmittauksia. Ottaen huomioon virheiden syyt, voidaan näiden mittausten pohjalta todeta, että OpenDSS-ohjelman kuorman malli pitää hyvin paikkaansa sähköauton latauksen kuorman mallintamiseen.

Tämä työ oli rajattu koskemaan vain yksivaiheista latausta latausasemasta, mutta tämän työn pohjalta voisi jatkaa ja laajentaa mittauksia. Voisi esimerkiksi kokeilla päteekö OpenDSS-ohjelman kuorman malli myös kolmivaiheiselle lataukselle. Lisäksi voisi kokeilla jännitteen nostamista, jolloin tarkasteltaisiin nimellisjännitettä suurempia jännitteitä. Myös jännitteenlaatua voisi analysoida tarkemmin ja tarkastella esimerkiksi yliaaltoja.

LÄHTEET

- [1] Global EV Outlook 2018, International Energy Agency, 2018, 139 s.
- [2] E. Korhonen, V. Linja-Aho, J. Mäkinen, M. Orrberg, Sähköautot ja latausjärjestelmät, ST-Kä-sikirja 41, 114 s.
- [3] Saeed D. Manshadi, Mohammad E. Khodayar, Khaled Abdelghany, Halit Üster, Wireless Charging of Electric Vehicles in Electricity and Transportation Networks, IEEE Transactions on Smart Grid (Volume: 9 , Issue: 5, Sept. 2018), 2018, 10 s.
- [4] Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q1/2019, Teknologiateollisuus, 2019.
- [5] A. Rautiainen, Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids, dissertation, 2015.
- [6] J. Laurikko, Present Status and Future Challenges of Electric Vehicles and Plug-In Electrical Hybrid Vehicles, Fortum Foundation's Award Ceremony, 2009.
- [7] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Boca Raton, FL : Taylor & Francis, CRC Press, 2018, 546 s.
- [8] A. Rautiainen, K. Vuorilehto, A. Supponen, J. Rekola, J. Mäkinen, DEE-54206 Electrical Energy Storages and Electric Vehicles, Lecture notes, 2018, 119 s.
- [9] H. Karsimus, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q2/2019, 2019.
- [10] EV CHARGE + Volvo XC60 T8 Twin-Engine Plug-In Hybrid Specifications, Saatavissa (viitattu 4.9.2019): <https://evchargeplus.com/ev-specs/volvo-xc60-t8-twin-engine-phev-specifications/>.
- [11] Electric Vehicle Database Mitsubishi Outlander PHEV, Saatavissa (viitattu 4.9.2019): <https://ev-database.uk/car/1130/Mitsubishi-Outlander-PHEV#charge-table>.
- [12] Electric Vehicle Database Volvo V60 D6 AWD, Saatavissa (viitattu 4.9.2019): <https://ev-database.uk/car/1049/Volvo-V60-D6-AWD#charge-table>.
- [13] Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, SFS 6000-7-722:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-722: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Sähköajoneuvojen syöttö, 2017, 13 s.
- [14] Sesko, Sähköajoneuvojen lataussuositus, 2018.
- [15] Sähköinfo, ST 51.90. Sähköauton lataaminen ja latauspisteiden toteutus, 2018, 21 s.
- [16] V. Linja-aho, Näin lataat sähköauton turvallisesti kotipistorasiasta, 2018, Saatavissa (viitattu 17.6.2019): <http://etn.fi/index.php/kolumni/7440-nain-lataat-sahkoauton-turvallisesti-kotipistorasiasta>.
- [17] plugit Sähköauton lataustavat, Saatavissa (viitattu 17.6.2019): <https://plugit.fi/fi-fi/article/etusivu/sahkoauton-lataustavat/137/>.

- [18] C. Panchal, S. Stegen, J. Lu, Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 21, Issue 5, October 2018, Sivut 922-937, 2018.
- [19] Energiategollisuus, SESKO, Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, Elenia Oy, JE-siirto Oy, ABB Oy, Sähkö liikenteen käyttövoimana osana energiamurrosta – EV-latausjärjestelmän suunnittelijan opas suunnittelu – toteutus - ylläpito, 2019, 57 s.
- [20] M. Pihlatie, M. Paakkinen, J. Laurikko, M. Laurikkala, P. Ylén, V. Peltola, P. Pylsy, Sähkö- ja kaasuautojen kustannustehokkaat edistämiskeinot - GASELLI loppura-portti, Valtioneuvoston kanslia, 2019, 74 s.
- [21] Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure, 2014, 20 s.
- [22] Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes Tukes muistuttaa sähköautojen latausturvallisuudesta, Saatavissa (viitattu 9.7.2019): <https://www.kiinteistolehti.fi/tukes-muistuttaa-sahkoautojen-latausturvallisuudesta/>.
- [23] Data-Systems, DELTACO jatkokaapecti, Saatavissa (viitattu 9.7.2019): <https://www.data-systems.fi/tuote/del-112b/>.
- [24] Plugit Finland Oy Latauspistoketyypit sähköautoille, Saatavissa (viitattu 9.7.2019): <https://plugit.fi/fi-fi/article/etusivu/latauspistoketyypit-sahkoautoille/135/#>.
- [25] CHAdeMO High Power, Saatavissa (viitattu 9.7.2019): <https://www.chademo.com/technology/high-power/>.
- [26] Trafi Liikennekäytössä olevat henkilöautot 31.12. muuttujina Merkki, Maakunta, Käyttövoima ja Vuosi, Saatavissa (viitattu 24.7.2019): https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/030_kanta_tau_103.px/table/tableViewLayout1/.
- [27] Trafi Henkilöautojen ensirekisteröinnit muuttujina Merkki, Maakunta, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi, Saatavissa (viitattu 24.7.2019): https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Ensirekisteroinnit/010_ensirek_tau_101.px/table/tableViewLayout1/.
- [28] Trafi Käytettynä maahantuodut henkilöautot muuttujina Merkki, Käyttöönotovuosi, Käyttövoima ja Kuukausi, Saatavissa (viitattu 24.7.2019): https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Kaytettyna_maahan-tuodut/040_yksmaah_tau_104.px/table/tableViewLayout1/.
- [29] Teknologiateollisuus, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q2/2019, 2019.
- [30] C. Liu, K.T. Chau, D. Wu, S. Gao, Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies, IEEE, 2013.
- [31] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 2, Gaudeamus, Helsinki, 2011, 551 s.
- [32] J.J. Grainger, W.D. Stevenson, Power system analysis, Singapore, 1994, 787 s.
- [33] J. Bastman, DEE-24000 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi -opintomoniste, Tampere, 2017, 185 s.
- [34] J. Bastman, DEE-12010 Kolmivaihejärjestelmät opintomoniste, Tampere, 2016, 135 s.
- [35] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakeluteknikka, Otatieto, 2009, 295 s.

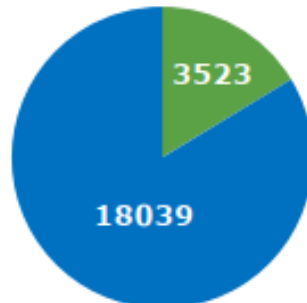
- [36] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 1, Gaudeamus, Helsinki, 2011, 520 s.
- [37] P. Kundur, Power System Stability and Control, 1994, 1176 s.
- [38] J. Bastman, Sähköverkon tehonjaon laskentamenetelmät, Tampereen teknillinen yliopisto, 2005, 90 s.
- [39] A. Mutanen, Improving Electricity Distribution System State Estimation with AMR-Based Load Profiles, dissertation, Tampere University of Technology, 2018.
- [40] D.P. Kothari, I.J. Nagrath, Modern power system analysis, Fourth Edition, New Delhi : Tata McGraw-Hill, 2011, 776 s.
- [41] Ahmed M.A. Haidar, Kashem M. Muttaqi, Mohammed H. Haque, Multistage time-variant electric vehicle loadmodelling for capturing accurate electricvehicle behaviour and electric vehicle impacton electricity distribution grids, IET Generation, Transmission & Distribution (Volume: 9 , Issue: 16 , 12 3 2015), 2015, 12 s.
- [42] A. Rautiainen, S. Repo, P. Järventausta, A. Mutanen, K. Vuorilehto, K. Jalkanen, Statistical charging load modeling of PHEVs in electricity distribution networks using National Travel Survey data, Tampere University of Technology, 2012.
- [43] E. Tiainen, Sähköasennukset: 1, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, Espoo, 2008, 226 s.
- [44] Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, päätoimittaja: Esa Tiainen, D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, Espoo : Sähköinfo Oy, 2017, 442 s.
- [45] E. Finni, J. Hietaniemi, R. Karppinen, T. Päivitys: Löppönen, M. Orrberg, P. Härkönen, ST 13.31 Rakennusten sähköverkon ja pienjänniteliittymän mitoittaminen, Sähkötieto ry, 2018.
- [46] Tampereen Sähköverkko Oy, Sähköverkkoon liittyminen tekniset ohjeet (pienjänniteliittymä).
- [47] T. Nurmi, E. Päivitys Tiainen, ST 53.21 Rakennusten sähköasennusten maadoitukset ja potentiaalintasaukset, Sähkötieto ry, 2018.
- [48] Keskuksen merkitys, Saatavissa (viitattu 23.10.2019):
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/10705016/1204792797383/1210598235193/1210598254225/1210598315291.html>.
- [49] K. Lahti, Luentokalvot, TTY:n kurssin DEE-23020, Sähköturvallisuus ja -asennukset opintomateriaali, Tampere, 2018.
- [50] S. Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 50160, Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, 2010, 65 s.
- [51] Liikennevirasto, Henkilöliikennetutkimus 2016 Suomalaisten liikkuminen, Helsinki, 2018, 113 s.
- [52] Kiinteistöjen latauspisteet kuntoon – päivitetty 29.10.2018, 2018, Saatavissa (viitattu 27.5.2019): https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kiinteistojen_latauspisteet_kuntoon.10705.shtml.
- [53] Electric Power Research Institute About EPRI, Saatavissa (viitattu 17.4.2019):
<https://www.epri.com/#!/about/epri?lang=en-US>.

[54] Roger C. Dugan, Davis Montenegro, The Open Distribution System Simulator™ (OpenDSS), 2018, 199 s.

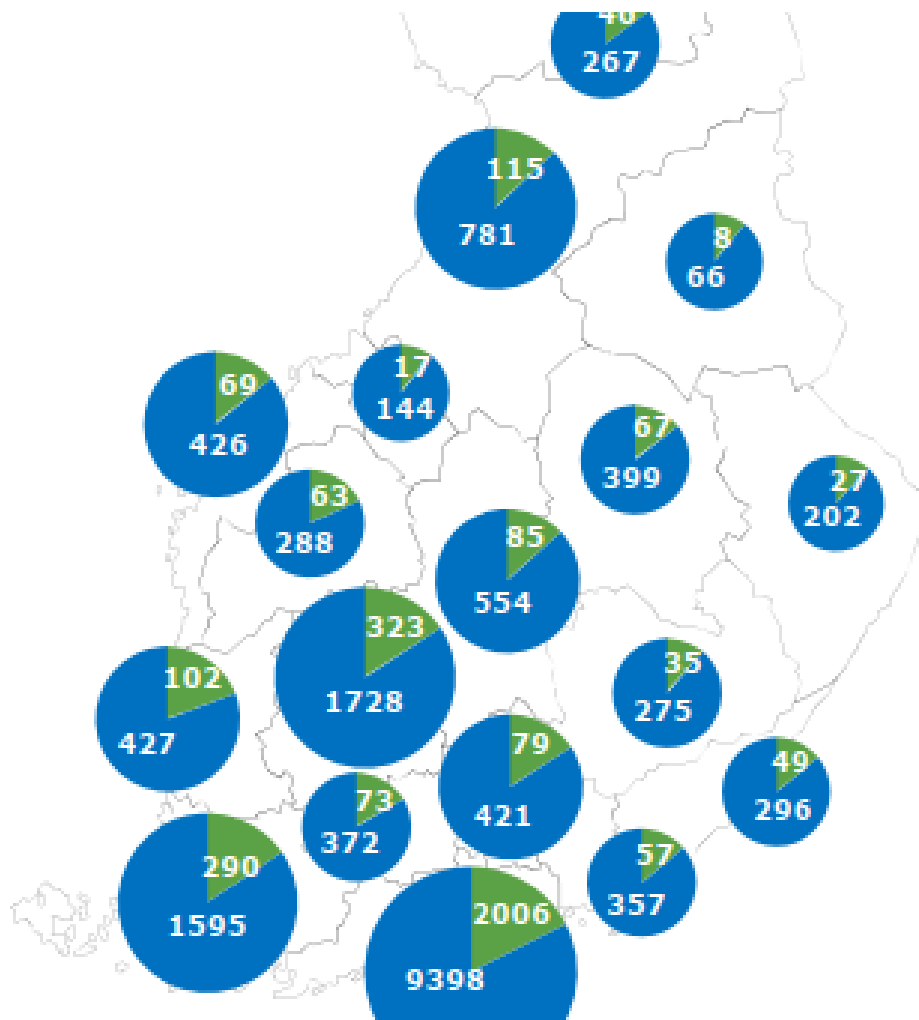
[55] PowerXplorer® PX5 User's guide, in: Anonymous (ed.), Dranetz, Edison, NJ 08818-4019 USA, 2005.

LIITE A: SÄHKÖAUTOJAKAUMA SUOMESSA MAAKUNNITTAIN 06/2019 [29]

TÄYSSÄHKÖAUTOT



LADATTAVAT HYBRIDIT



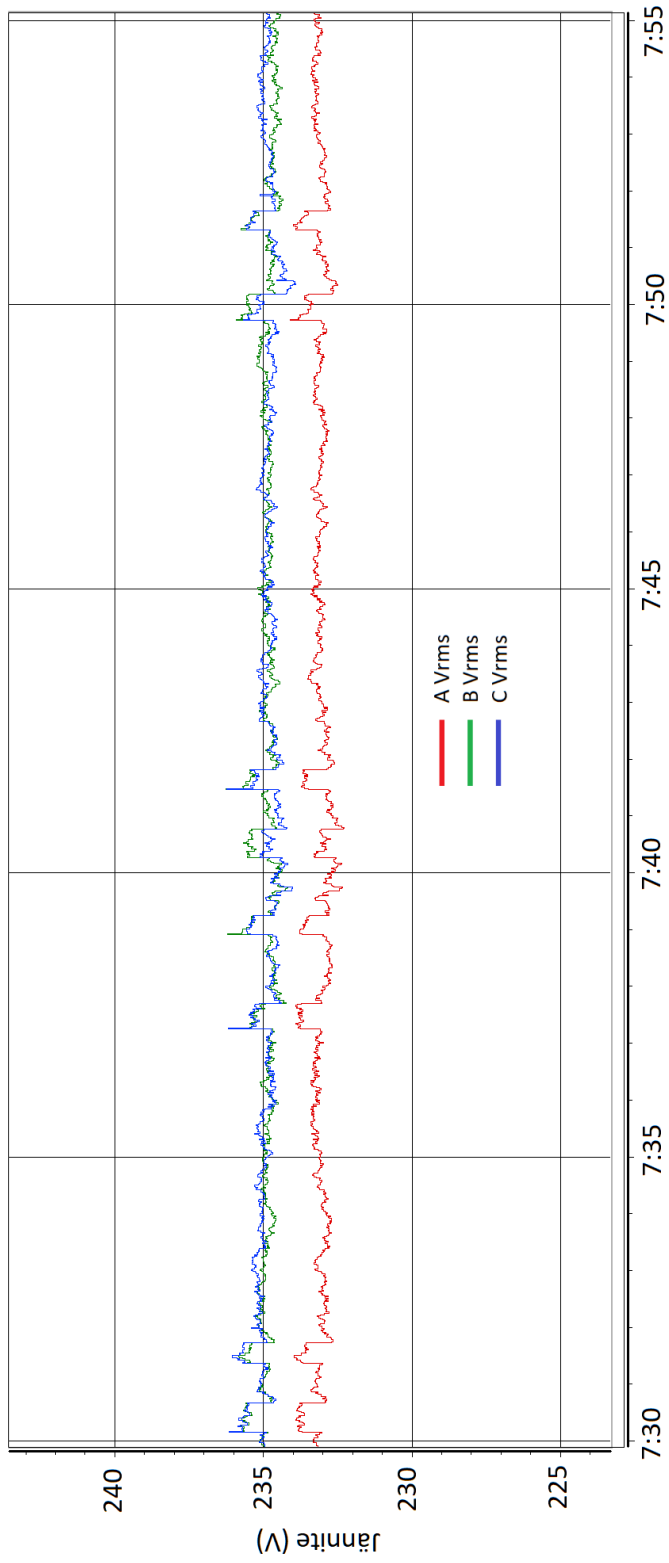
LIITE B: LATAUSVERKOSTO SUOMESSA MAAKUNNITTAIN 06/2019. [29]

Maakunta	Lataus- paikat	Type 2		Tesla Dest.Charger		CHAdEMO		CCS		Tesla Supercharger	
		paikat	pisteet	paikat	pisteet	paikat	pisteet	paikat	pisteet	paikat	pisteet
Uusimaa	266	256	1101	16	28	50	69	48	67		
Varsinais-Suomi	71	70	161	6	10	17	22	18	23	1	8
Pirkanmaa	58	57	170	1	2	14	17	14	17	1	8
Lappi	51	50	100	3	5	6	7	5	6		
Pohjois-Pohjanmaa	44	39	84	3	6	13	14	12	13	1	4
Satakunta	40	39	69			6	6	4	4		
Pohjois-Savo	36	35	88	1	1	6	7	6	7		
Etelä-Pohjanmaa	34	32	68	1	1	7	7	5	5	1	8
Päijät-Häme	29	29	74	2	3	4	5	4	5	1	8
Keski-Suomi	29	25	73	1	1	9	10	9	10	1	4
Etelä-Savo	26	26	61	1	1	8	8	8	8		
Kanta-Häme	21	21	48	1	1	3	4	3	4		
Kymenlaakso	19	18	39			6	8	6	8	1	10
Keski-Pohjanmaa	18	18	32			1	1	1	1		
Pohjanmaa	17	15	32			7	8	7	8		
Etelä-Karjala	17	17	47	1	2	4	5	4	5		
Kainuu	16	16	33	2	4	3	4	3	4		
Pohjois-Karjala	14	14	40			4	5	4	5		
Ahvenanmaa	12	12	19	2	4	4	4	4	4		
Yhteensä	818	789	2339	41	69	172	211	165	204	7	50

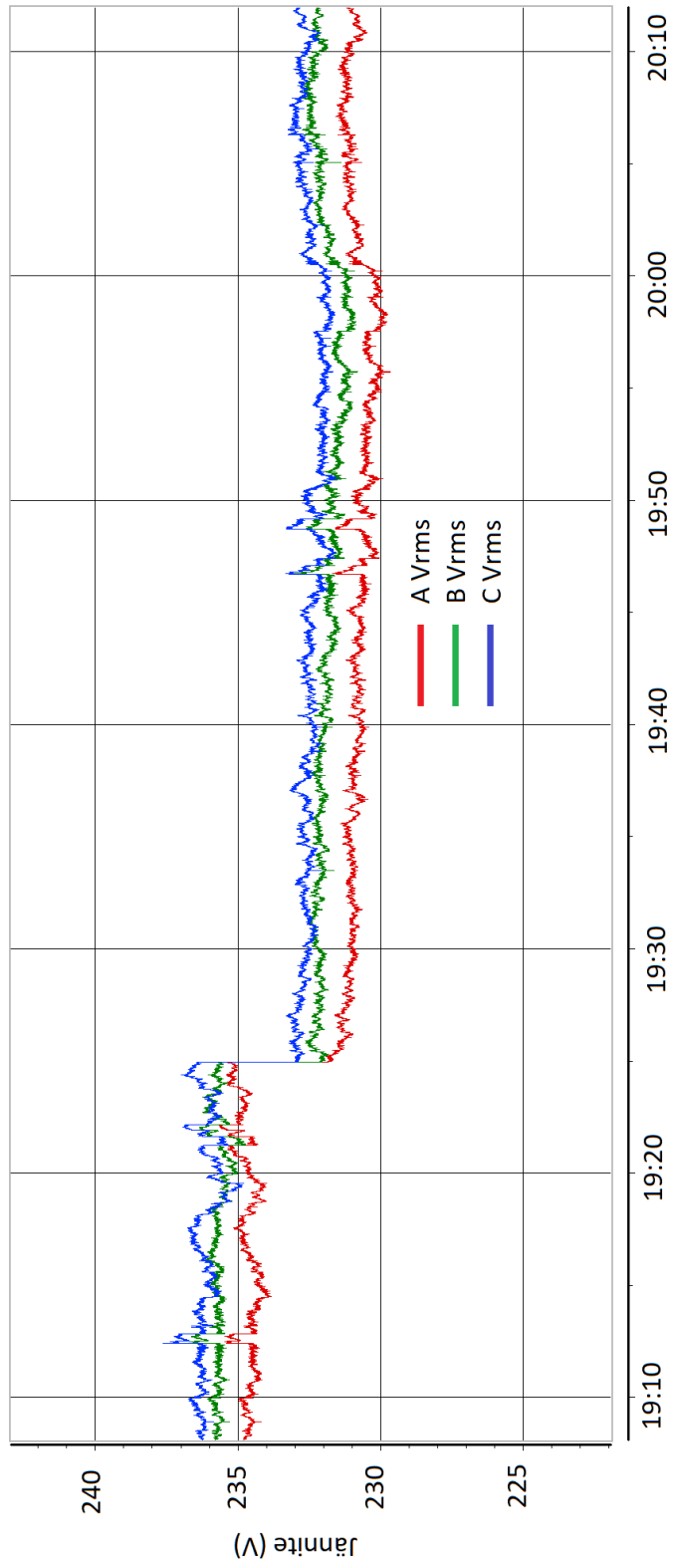
LIITE C: SÄHKÖAUTOJEN LATAUSPISTEIDEN PÄÄTÖKSENTEKO ASUNTO-OSAKEYHTIÖSSÄ [52]

Hankkeen tyyppi	Päätöksenteko
<p>Taloyhtiön hanke (autopaikat yhtiön hallinnassa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - kaikki autopaikat muutetaan latauspisteiksi. 	Vaaditaan kaikkien osakkaiden suostumus.
<p>Taloyhtiön hanke (autopaikat yhtiön hallinnassa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - autopaikoista muutetaan latauspisteiksi enintään sähköjärjestelmän nykyisen kapasiteetin sallima määrä. 	Vaaditaan yksinkertainen enemmistö yhtiökokouksessa.
Osakasvähemmistön hanke (autopaikat yhtiön hallinnassa).	Vaaditaan vähintään 2/3 enemmistö yhtiökokouksessa edustetuista osakkeista ja annetuista äänistä.
Osakkaan oma muutoshanke (autopaikat osakashallinnassa).	Vaaditaan taloyhtiön lupa.

LIITE D: JÄNNITEMITTAUS KLO 7:30–7:55



LIITE E: JÄNNITEMITTAUS KLO 19:10–20:10



LIITE F: JÄNNITEMITTAUS KLO 16:20–17:20