

**Pienjänniteverkkoinfrastruktuurin kapasiteetin riittäminen  
sähköautoilun lisääntyessä -  
Adequacy of low-voltage network infrastructure capacity as  
EV popularity increases**

Janne Riikonen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Janne Riikonen

### **Pienjänniteverkkoinfrastruktuurin kapasiteetin riittäminen sähköautoilun lisääntymisessä**

2021

Kandidaatintyö.

38 s.

Ohjaaja: Toni Hannula

Tarkastaja: Antti Kosonen.

**Hakusanat:** pienjännite, sähköverkko, sähköauto, sähköajoneuvo, simulaatio, jakeluverkko, verkkoyhtiö, teho, lataus

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on selvittää pienjänniteverkkoinfran kestävyys Suomessa, kun sähköautoilu lisääntyy sekä onko verkon tehonsiirtokapasiteettia kasvatettava tämän vuoksi. Sähköautojen määrän kasvusta syntyvä lataamistehon kasvu voi aiheuttaa ongelmia verkossa, joita ovat muun muassa jännitteen laadulliset ongelmat sekä verkkokomponenttien tehonsiirtokapasiteettien ylittyminen.

Sähköautojen lataamistehon verkkovaikutuksia tutkittiin kirjallisuuskatsauksella verkkosimulaatioihin. Verkkosimulaatiot olivat tutkimusryhmien suorittamia simulaatioita todellisille pienjännite- ja keskijännitejakeluverkoille eri sähköautojen levinneisyysasteilla. Verkkosimulaatioiden tarkastelu valittiin menetelmäksi, koska omien verkkosimulaatioiden suorittaminen on erittäin työläs prosessi sekä herkkä laskentaparametrien muutoksille.

Simulaatiotulokset osoittavat, että jo pienillä sähköautojen levinneisyysasteilla kontrolloimattomalla lataamisella verkossa esiintyy ongelmia kuten komponenttien ylikuormittumista sekä liiallista jännitteenalenemaa. Tämä tarkoittaa sitä, että verkkoa olisi vahvistettava. Verkon vahvistamistoimilta voitaisiin välttyä tai toimia voisi lieventää, jos sähköautojen omistajien lataamiskäyttäytymistä kyettäisiin muuttamaan. Monissa verkkosimulaatioissa tutkimusryhmä ehdotti ja simuloi keskitetyn älykkään lataamisen vaikutuksia verkoissa. Keskitetyn älykkään lataamisen huomattiin parantavan verkon käytettävyyttä merkittävästi.

Simulaatiotulosten perusteella voidaan sanoa, että sähköautojen määrän kasvulla tulee olemaan saneerausvaikutuksia verkossa, jos lataamista ei kyetä hallitsemaan älykkäästi. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tällaista keskitettyä älykästä lataamista ei ole vielä sovellettu todellisissa verkoissa. Verkkoyhtiöiden tulisi simuloida verkkojaan sähköautojen lataamistehon kasvun vaikutuksien näkemiseksi, sillä simulaatiotuloksia on hankala yleistää verkkojen eroavaisuuksien vuoksi.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Janne Riikonen

**Adequacy of low-voltage network infrastructure capacity as EV popularity increases**

2021

Bachelor's Thesis.

38 p.

Supervisor: Toni Hannula

Examiner: Antti Kosonen

The objective of this bachelor's thesis is to investigate the adequacy of low voltage infrastructure in Finland as EV-popularity increases and if upgrades to power transmission capacity are needed because of that. With the EV popularity increasing, also the power demand increases which can have such negative impacts on the grid as voltage quality problems and components' power transmission capacity limits being exceeded.

The grid effects of EV charging were examined using a literature review into grid simulations. The grid simulations were carried out by research groups on real low and medium voltage distribution networks with varying levels of EV penetration. A literature review was chosen to be the method because carrying out own simulations is a tedious task which is very sensitive to changes in the calculation parameters.

The simulation results indicate that with low EV penetration levels uncontrolled charging proved to be problematic for the grid as components became overloaded and voltage drop exceeded acceptable limits. This indicates a need for network infrastructure reinforcement. The infrastructure reinforcement could be avoided or lessened if charging behavior of EV owner could be altered. In many simulations the research group proposed and simulated the

effects of a centralized smart charging. Centralized smart charging was found to significantly improve network usability.

Based on the simulation results it can be said that the increase in the number of EVs will have network reinforcement effects if charging cannot be controlled in a smart way. Based on a literature review such centralized smart charging has not yet been applied in real networks. Distribution service operators should carry out simulations on their networks to see the effects of different EV penetration levels as it is hard to generalize and apply these simulation results due to network differences.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	8
2.	Pienjänniteverkon nykytila.....	10
2.1	Pienjänniteverkkojen mitoitus.....	10
2.2	Kuormitusten ennustaminen.....	11
2.3	Käytettävyyden tekniset rajaehdot.....	11
2.4	Pienjänniteverkon tehokaista.....	12
3.	Sähköautot.....	14
3.1	Täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrien kehitysnäkymät.....	14
3.2	Sähköautojen latausenergian kasvu.....	15
3.3	Sähköautojen lataustavat.....	16
3.3.1	Kevyiden ajoneuvojen lataus (lataustapa 1).....	17
3.3.2	Hidas lataus (lataustapa 2).....	17
3.3.3	Peruslataus (lataustapa 3).....	17
3.3.4	Teholataus (lataustapa 4).....	18
3.4	Sähköautojen latausajat.....	19
3.5	Älykäs lataaminen.....	19
3.6	Älykkään lataamisen laaja soveltaminen.....	20
4.	Lataamistehon kasvun vaikutukset PJ-verkossa.....	21
4.1	Tehonsiirtokapasiteetti.....	21
4.2	Jännitteenalenema.....	22
4.3	Häviökustannukset.....	23
4.4	Päivittäinen lataaminen ja vuorottelu.....	25
5.	Pienjänniteverkon simulaatiot.....	26
5.1	Laskentaparametrit.....	26
5.2	Simulaatiotavat.....	26
5.3	Simulaatiotuloksia.....	27
5.4	Spot-hintaohjattu lataaminen.....	29
5.5	Simulaatiotulosten analysointi.....	30
6.	Tehonkasvun merkitys verkkoyhtiölle ja asiakkaalle.....	32
6.1	Verkkoon liittyminen ja liittymäkoon suurentaminen.....	32
6.2	Verkkoyhtiön näkökulma.....	33
6.3	Asiakkaan näkökulma.....	33
6.4	Verkkosaneeraamisen kustannukset.....	34
7.	Johtopäätökset.....	36
8.	Yhteenveto.....	37
	Lähteet.....	39

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

CCS	Combined Charging System, teholatauksessa käytetty standardi
FEV	Fully Electric Vehicle, täyssähköauto
HEV	Hybrid Electric Vehicle, hybridauto
LCC	Local Control Charging, asiakaskohtainen älykäs lataaminen
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
PHEV	Plug in Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridauto
PJ	Pienjännite

$c_h$	häviökustannus
$\varepsilon$	annuiteettikerroin
$K$	vaihtokustannus
$P$	teho
$p$	laskentakorkokanta
$r$	resistanssi
$S$	taloudellinen rajateho
$t$	aika
$U$	jännite

### Alaindeksit

h1	nykyinen
h2	verrattava
N	nimellinen
vaihto	johdinvaihto

## 1. JOHDANTO

Sähköautojen määrä liikenteessä kasvaa vuosi vuodelta kiihtyvää tahtia. Euroopan parlamentissa hyväksytyn lakiesityksen mukaan henkilöautojen hiilidioksidipäästöjä tulee vähentää 37,5 % vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan parlamentti, 2018) Hiilidioksidipäästörajojen tiukkenemisen vuoksi autonvalmistajat tuovat vaihtoehtoisen käyttövoiman ajoneuvoja lisää markkinoille.

Liikenteen päästöt ovat noin viidesosa koko Suomen hiilidioksidipäästöistä. Hallitus onkin linjannut, että liikenteen päästöt tulisi puolittaa vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Yhtenä osana tavoitteen saavuttamiseksi kuului tavoite 250 000 sähkökäyttöisestä autosta liikenteessä vuonna 2030. Vuoden 2020 lopussa täyssähköautoja oli liikennekäytössä 9 673 kappaletta ja ladattavia hybridejä jo 45 650 kappaletta. (Traficom, 2021)

Sähköautojen määrän kasvaessa kasvaa väistämättä myös niiden lataamisen tarve. Sähköautojen lataaminen vaatii suuria tehoja pienjänniteverkosta. Suurien tehojen lisäksi latausajat voivat olla pitkiä. Pohjoismainen jakeluverkkojen rakenne on kuitenkin hyvin kykenevä toimittamaan suuriakin tehoja. Suomessa lähes jokainen kotitalous on kolmivaiheisen pienjännitejakelun piirissä sekä monista pihosta löytyy lämmityspistoke auton talvilämmitystä varten. Kylmät olosuhteet, suuret kuormat kuten talojen sähkölämmitys ja saunakiukaat ovat myös vaikuttaneet verkon mitoitukseen.

Lataustehot voivat kuitenkin olla suuria ja aiheuttaa ongelmia verkolle, vaikka verkko Suomessa onkin verrattain vahva. Ongelmalliset tilanteet ilmenevät, kun useat kuormat ovat samanaikaisesti päällä. Verkon mitoituksen kannalta olennainen huipputeho voi tällöin ylittyä johtaen erilaisiin ongelmiin. Tutkimuksissa on huomattu, että hallitsematon sähköajoneuvojen lataaminen voi aiheuttaa suuria tehopiikkejä verkossa. (Qian et al., 2010) (Lassila et al., 2010) Latauksesta syntyvää huipputehoa pystytään kuitenkin rajoittamaan älykästä lataamista käyttämällä, jossa lataaminen ajoitetaan huippukuormahetkien ulkopuolelle.

Tässä työssä tutkitaan sähköautojen latauksen kasvun verkkovaikutuksia pienjänniteverkon tasolla Suomessa. Pienjänniteverkolle on vaikea muodostaa yleisen tason mallia, jota tutkimalla voisi tehdä johtopäätöksiä lataamisen verkkovaikutuksista. Tämän vuoksi on tutkit-



tava erilaisia simulaatioita, jotka on suoritettu usein olemassa oleville verkon osille. Simulaatioiden suunnittelussa parametrivalinnat, oletukset ja verkon rakenne vaikuttavat suuresti lopputulokseen, joten tulosten yleistäminen on täten myös haasteellista. Simulaatiotuloksia keräämällä ja vertailemalla pyritään luomaan yleinen kuva lataustehon vaikutuksista verkossa.

Työn päätutkimuskysymys on:

Miten pienjänniteverkko kestää kasvaneen lataustehon ja tuleeko kapasiteettia kasvattaa?

Alatutkimuskysymyksiä kuten:

Mitkä tekijät määrittävät verkon kapasiteetin? ja Mitä kapasiteetin kasvattaminen tarkoittaa eri osapuolille?

Sähköautojen määrän lisääntymisestä aiheutuvan lataustehon kasvun verkkovaikutuksia pyritään tutkimaan tässä työssä kirjallisuuskatsauksen avulla. Pienjänniteverkon mitoituskäytännöt ovat hyvin dokumentoituja kirjallisuudessa ja sähköautojen verkkovaikutuksista on tehty useita opinnäytetöitä sekä verkkosimulaatioita. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään, mitä tietoa aiheesta on jo olemassa. Tietoa on etsitty muun muassa IEEE Xplore ja LUTPub-tietokannoista. Aihetta käsittelevien artikkeleiden lähteitä on myös käytetty tiedonhaussa.

Työ etenee selvittäen ensin pienjänniteverkon mitoituksen taustat, sähköautojen lataamiseen liittyvät tekijät, kuten lataamistehot sekä tulevaisuuden näkymät ja tehonkasvun sähköteknisen merkityksen verkossa. Taustojen selventämisen jälkeen tarkastellaan verkkosimulaatiotuloksia ja analysoidaan niitä, selvitetään tehonkasvun merkitystä verkkoyhtiölle ja sen asiakkaille sekä lopuksi muodostetaan johtopäätökset työn tuloksista ja kootaan yhteenveto työn sisällöstä.

Huippuenergia Oy yritysaihe.

## 2. PIENJÄNNITEVERKON NYKYTILA

Pienjänniteverkko vastaa sähkön jakelusta pienkuluttajille. Euroopassa pienjänniteverkon vaihejännite on 230 V ja pääjännite 400 V. Jakelumuuntajat sijaitsevat usein kaupunkialueilla lähellä käyttöpaikkoja, kun maaseudulla etäisyydet voivat olla huomattavasti pidempiä. Pienjänniteverkkoja käytetään tavallisesti säteittäisinä. Tämä tarkoittaa sitä, että verkossa on yksi syöttöpiste, pienjänniteverkon tapauksessa tämä on 20/0,4 kV jakelumuuntamo. (Lakervi, 2008)

Suomalaisissa pienjänniteverkoissa kuluttajat ovat yleensä kytketty verkkoon kolmivaiheisen liittymän välityksellä. Kolmivaiheinen liittäminen mahdollistaa melko suurien tehojen kulutuksen, joka on sähköautojen lataamisen kannalta tärkeää.

### 2.1 Pienjänniteverkkojen mitoitus

Pienjänniteverkon mitoituksessa on usein kyse suunnittelutehtävästä, jossa yksittäinen sähkökäyttäjät liitetään, uudisrakennus sähköistetään tai olemassa olevaa verkkoa kunnostetaan. Verkon mitoituksessa pyritään valitsemaan kokonaisuus, jonka investointi- ja käyttökustannusten summa olisi mahdollisimman pieni. (Lakervi, 2008) Kokonaisuuden tulee myös täyttää siltä vaaditut tekniset vaatimukset. Teknisiä rajaehdoja on käsitelty luvussa 2.3.

Pienjänniteverkon tehonsiirtokapasiteetin määrittää pitkälti jakelumuuntajan mitoitus. Jakelumuuntajat mitoitetaan siihen liittyvän pienjänniteverkon kuormituksen ja odotetun mahdollisen kuormituksen kasvun perusteella. Verkkotietojärjestelmästä usein saadaan kuormitusten suuruus ja ajallinen vaihtelu, joista kuormitusmallien ja tilastomatematiikan avulla järjestelmä laskee huipputehon verkossa (Simonen, 2006). Huipputehon avulla mitoitetaan jakelumuuntaja.

Perinteisten kuormitusmallien avulla voidaan karkeasti mitoittaa jakelumuuntaja 50 sähkölämmitteiselle omakotitaloasiakkaalle. Laskentaparametrit ja tulokset on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 50 sähkölämmitteisen omakotitalon jakelumuuntajan mitoitus. 1 % ylitystodennäköisyys, 50 % hajonta.

OKT vuosienenergia [kWh]	Asiakasmäärä	Keskiteho [kW]	Huipputeho [kW]	Valittu muuntaja
19 000	50	333	388	500 kVA

Taulukossa 2.1 esitetyn muuntopiirin huipputeho on 388 kW, joten valitaan alueelle esimerkiksi 500 kVA muuntaja, kun muita ulkoisia tekijöitä ei ole tiedossa.

Kuormitusmallien käyttö verkkojen mitoituksessa voi aiheuttaa ongelmia sähköautojen yleistyessä, koska ne perustuvat vanhaan kulutusdataan ja vuosienenergiaoletuksiin. Sähköautojen latauskuorma ei välttämättä käyttydy samalla tavalla, kuin kuormat 80- ja 90-luvuilla tehdyissä mittauksissa, joiden pohjalta kuormitusmallit luotiin. Korenoff (2010) ehdotti VTT:n tutkimusraportissa, että sähköautoille tulisi luoda kokonaan uudet kuormituskäyrät, sillä nykyiset kuormitusmallit eivät mallinna sähköautoja oikein.

## 2.2 Kuormitusten ennustaminen

Kuormitusten ennustaminen on tärkeä osa pienjänniteverkon suunnittelua. Kuormitusten ennustamisessa yleensä pyritään ennustamaan vuosienenergiaa. Yleissuunnittelussa alueet jaetaan profiilinsa, maaseudulla kuntajaon ja kaupungeissa kaupunginosan, mukaan. Kuormitusta jaetuille alueille arvioidaan asiakasmäärän ja heille ominaisen kulutuksen mukaan. Nämä laskemalla saadaan kokonaiskulutus alueelle. Energiaennusteet muuttamalla kuormitusmallien avulla saadaan tehoennusteet, joiden pohjalta verkon mitoitus tehdään. (Lakervi, 2008) Ongelmana tässä arviointitavassa on se, että kulutus arvioidaan historiallisen datan perusteella, joten sähköautojen määrän kasvun merkitys kuormituksessa voi jäädä aliarvioituksi, johtaen alimitoitettuun verkkoon.

## 2.3 Käytettävyyden tekniset rajaehdot

Pienjänniteverkon käytettävyyteen liittyy rajaehdoja, jotka asettavat rajat verkon tehonsiirtokapasiteetille. Nämä rajaehdot ovat kuormitettavuus, oikosulkukestoisuus, jännitteenalennema ja standardin SFS 6000-8-801 vaatimukset liittyen syötön automaattisen poiskytkentän suojaukseen. (Lakervi, 2008) Oikosulkukestoisuus ja syötön automaattinen poiskytkentä eivät ole tämän työn kannalta olennaisia asioita, joten niiden merkitykseen ei keskitytä.

Kuormitettavuus on johtimen ominaisuuksien perusteella määritelty virta, jolla johdin ei lämpene yli sille määritetyn maksimilämpötilan. Tätä lämpötilaa ei tule normaalikäytössä ylittää. Kuormitusvirran kasvu voi siis aiheuttaa liian suuren lämpötilan johdolle, jolloin kuormituksen perusteella se tulee uusiksi. Oikosulun aikainen johtimen lämpötila voi olla suurempi, kuin kuormitusvirran aiheuttama lämpötila, koska oikosulkuvirta on lyhytaikainen. (Lakervi, 2008) Kuormitettavuus on myös määritettävissä muille verkkokomponenteille.

Jännitteenalenemaa syntyy pienjänniteverkossa johtojen impedanssin vuoksi. Impedanssiin voi vaikuttaa pääasiassa johtimen poikkipinta-alaa ja materiaalia muuttamalla. Kuormitus-  
tehon kasvaessa virta kasvaa, johtaen suurempaan jännitteenalenemaan. Kuormitettavuutta ja jännitteenalenemaa käsitellään vielä tarkemmin luvuissa 4.1 ja 4.2.

#### **2.4 Pienjänniteverkon tehokaista**

Pienjänniteverkon kapasiteettia voi yksinkertaisimmillaan tarkastella asiakaskohtaisen tehokaistan avulla. Asiakaskohtainen tehokaista on suurin teho, jonka verkko teknisesti kestä, jos kaikki verkkoon liittyvät ottavat verkosta tämän tehon samanaikaisesti. Verkkoja ei mitoiteta asiakkaiden liittymäkokojen perusteella, sillä kuormien risteilyn vuoksi tämä johtaisi hyvin ylimitoitettuun verkkoon. Yksinkertaisimmillaan tehokaista voidaan laskea jakamalla muuntajan nimellisteho sen syöttämien asiakkaiden määrällä.

Esimerkkinä voidaan laskea tehokaistat Tikan (2010) diplomityössä tarkastelemille pienjänniteverkkojen muuntopiirien asiakkaille. Tikka tarkasteli sähköautojen pikalataamisen verkko-  
kovaikutuksia kahdessa todellisessa pienjännitemuuntopiirissä Keravan Energia Oy:n alueella. Taajamamuuntopiirissä oli 267 kpl suurimmaksi osaksi sähkölämmitteistä omakotitaloasiakasta, joita syötti 500 kVA muuntaja, jonka huippukuorma oli 448 kW. Muuntopiirin kuormitus oli jo ennen sähköautolataamista suurta, joten saneeraustoimet olisivat jo olleet ajankohtaisia. Haja-asutusalueen muuntopiirissä oli 16 asiakasta, joista 11:sta oli suora sähkölämmitys. Muuntopiirin jakelumuuntaja oli 100 kVA, jonka huippukuorma oli 80 kW. Näiden tietojen pohjalta lasketut tehokaistat näkyvät taulukossa 2.2. Taulukkoon 2.2 on laskettu myös luvussa 2.1 käsitelty 50 omakotitaloalueen muuntopiirin tehokaista.

Taulukko 2.2 Muuntopiirien tehokaistat

<b>Muuntopiiri</b>	<b>Jakelumuuntaja [kVA]</b>	<b>Asiakasmäärä</b>	<b>Tehokaista [kVA/asiakas]</b>
<b>Taajama</b>	500	267	1,9
<b>Haja-asutus</b>	100	16	6,3
<b>50 OKT</b>	500	50	10

Huomataan, että taajamamuuntopiirin tehokaista on huomattavasti pienempi, kuin haja-asutusalueen muuntopiirin, mutta 50 omakotitalon muuntopiirin tehokaista on huomattavasti molempia suurempi. Erot johtuvat todennäköisesti mitoituksessa käytetyistä laskentaparametreista. Pieni tehokaista voidaan mieltää huonoksi sähköautojen lataamisen verkkovaikutusten kannalta.

### 3. SÄHKÖAUTOT

Sähköautoiksi luokitellaan autot, jotka käyttävät sähkömoottoreita voimanlähteenään. Sähköautoihin kuuluvat täyssähköautot (FEV) sekä hybridautot, jotka käyttävät sähkömoottorin lisäksi yleensä polttomoottoria toisena voimanlähteenä. Hybridautot voidaan jakaa vielä ladattaviin (PHEV) ja tavallisiin hybrideihin (HEV). Täyssähköautoihin luokitellaan myös polttokennoautot, jotka tuottavat sähköenergiansa polttokennon avulla. Useimmiten polttokennoautoissa polttoaine on vetyä.

Tässä työssä sähköautoina käsitellään vain ladattavia täyssähköautoja ja -hybridejä, koska näillä sähköautotyypeillä on pienjänniteverkon kannalta merkittävät latausvaikutukset.

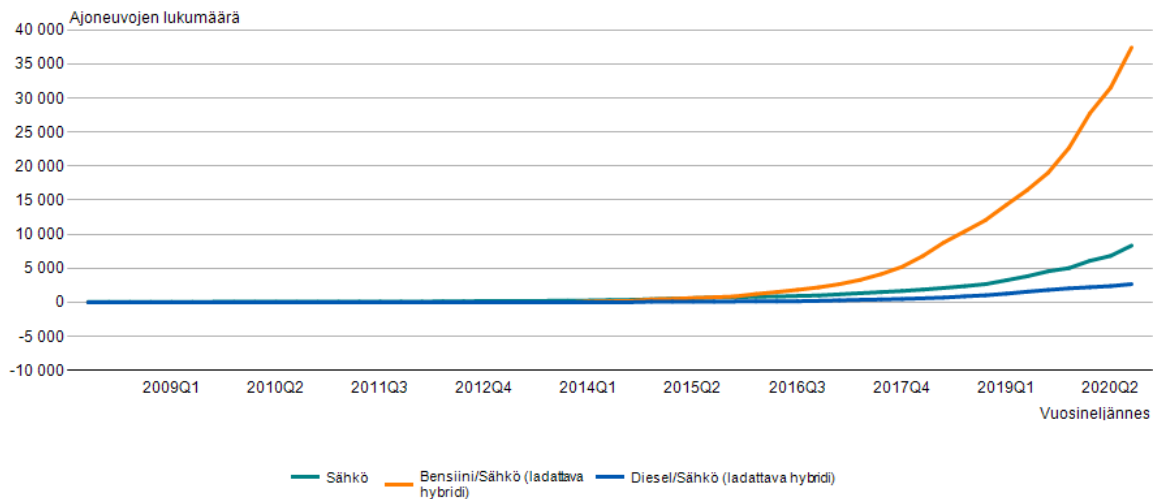
#### 3.1 Täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrien kehitysnäkymät

Hiilidioksidi-päästövähennysten tarve ajaa säännöstelyä sähköautoille ja ladattaville hybrideille edulliseen suuntaan. Suomen tavoitteena on vähentää liikenteen päästöjä puolella siitä, mitä päästöt olivat vuonna 2005, vuoteen 2030 mennessä. Tieliikenne aiheuttaa noin viidesosan koko Suomen päästöistä, joten kyseessä on merkittävä päästöjen lähde.

Työ- ja elinkeinoministeriön 2017 julkaisemassa *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030* sanotaan, että tavoitteena on vähintään 250 000 sähkökäyttöistä ajoneuvoa Suomessa 2030 mennessä. Tämä vastaisi noin 8 % koko Suomen autokannasta. Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM) taas ehdottaa yhtenä ratkaisuna päästötavoitteen saavuttamiseksi sähköautojen vuoden 2030 tavoitemäärän asettamista 700 000 sähköautoon, joista suurimman osan tulisi olla täyssähköautoja (LVM, 2020).

Vuoden 2020 kolmannella vuosineljänneksellä täyssähköautoja ja ladattavia hybridejä Traficomien tilastoihin oli merkitty 48 464 kappaletta. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu liikennekäytössä olevien sähköautojen lukumäärän historiallista kehitystä Manner-Suomessa alkaen vuodesta 2008.

Liikennekäytössä olevat ajoneuvot muuttujina Käyttövoima ja Vuosineljännes. MANNER-SUOMI, Kaikki autot.



Lähde: Traficom

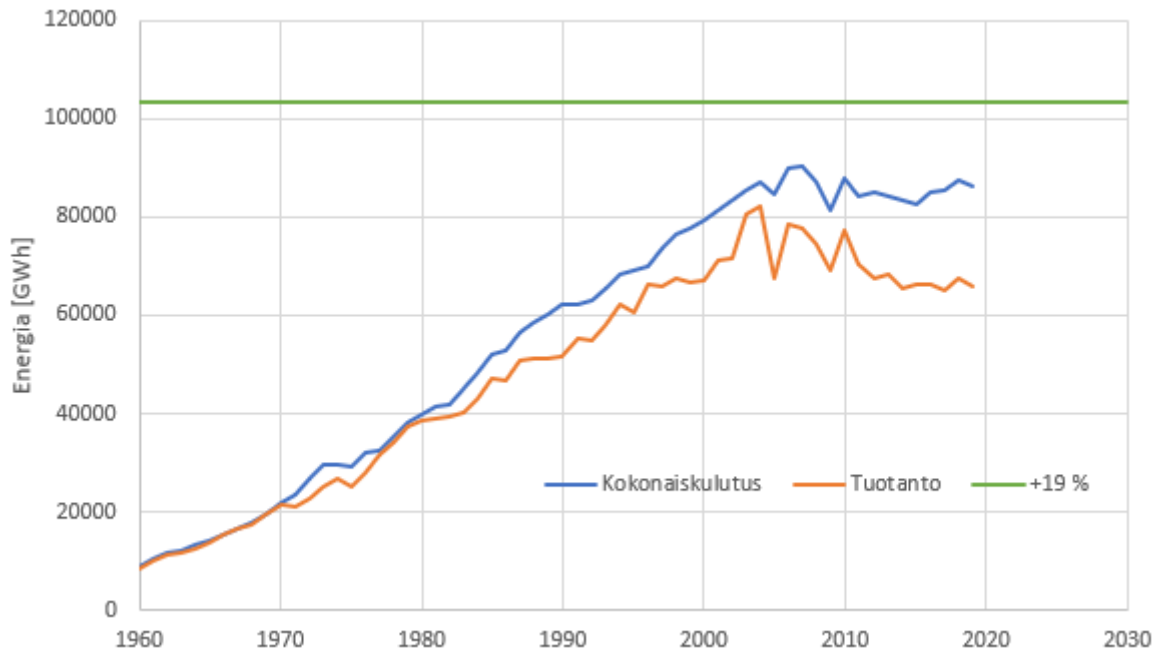
Kuva 2.1 Täyssähkö- ja ladattavien hybridiautojen määrien kehitys manner-Suomessa, kaikki autotyypit, 2008Q1-2020Q3 (Traficom, 2020)

Käyttäen konservatiivisempaa 250 000 sähköauton määrää vertailussa sähköautojen lukumäärän tulisi kasvaa yli viisinkertaiseksi. 700 000 sähköautolla tämä vastaisi 14-kertaista määrää nykyisestä. Nousu näihin sähköauto määriin 9 vuodessa tarkoittaisi noin 20- ja 35 %:n vuosittaista kasvua. Vaikka lukumäärien haitari on laaja, voidaan niistä kuitenkin nähdä, että sähköautojen määrän odotetaan kasvavan seuraavan kymmenen vuoden aikana merkittävästi.

### 3.2 Sähköautojen latausenergian kasvu

Sähköautojen lataamisesta syntyvää kuorman kasvun arviointiin tulee tuntea henkilöautokannan määrä, asukasluku ja tutkittavan verkkoalueen verkkoon kytkettyjen kotitalouksien määrä. Vuosien 2004–2010 henkilöliikenne tutkimuksen ja tilastokeskuksen tilastotiedoilla, 100 % sähköautojen levinneisyysasteella, lataaminen kasvattaisi vuosittaista energiankulutusta noin 19 %. (Tikka, 2010) Tästä voidaan tulkita se, että itse sähköautojen lataamisen energiamäärät ovat nykyiseen kulutukseen verrattuna merkittäviä. Täytyy kuitenkin huomioida se, että 19 % vuosienergian kasvu vaatii jokaisen polttomoottoriauton korvautumisen täyssähköautolla.

Kuvassa 3.3 on kuvattu sähkön kokonaiskulutus ja tuotanto vuosina 1960–2019. Kuvassa näkyy myös aiemmin mainittujen tilastotietojen pohjalta muodostettu viitteellinen sähkönkulutustaso, jos koko autokanta sähköistyisi. Historiallisesti tuotanto Suomessa on seurannut kulutusta, mutta ero niiden välillä on hitaasti kasvanut. Sähköautojen lataamiseen vaadittu energia saattaa kasvattaa tätä eroa entisestään johtaen mahdollisesti tuontisiirtokapasiteetin ongelmiin.



Kuva 3.3 Sähkön kulutus ja tuotanto Suomessa vuosina 1960–2019 sekä kulutuksen taso, jos liikenne sähköistyisi täysin.

### 3.3 Sähköautojen lataustavat

Sähköautoja ladataan useimmiten pienjänniteverkosta, jota koskee SFS-6000 standardin asetukset pienjänniteverkolle. Latauksessa sähköauton latausjohto kytketään korissa sijaitsevan pistokkeen ja latauskäyttöön tarkoitetun pistorasian välille. Sähköautojen lataustavat voidaan jakaa sähköteknisen alan kansallisen standardointijärjestö SESKO ry:n lataussuosituksen mukaan neljään eri luokkaan lataustehon ja käyttötarkoituksen mukaan. Joitakin soveltuvia sähköautoja voi myös ladata ilman latausjohtoa induktiivisen lataamisen avulla. Tässä lataustavassa auton alla sijaitseva käämi indusoi latausvirran auton pohjassa sijaitsevaan käämiin.



Sähköauton lataustavalla on merkitystä verkkoinfran kestävyuden kannalta, koska suuremmat lataustehot voivat vaikuttaa luvussa 4 käsiteltäviin tehonsiirtokapasiteettiin, jännitteenalenukseen ja häviökustannuksiin. Lataustavalla voi olla myös merkitystä asiakkaan liittymän mitoittamiseen, jota käsitellään luvussa 6.

### **3.3.1 Kevyiden ajoneuvojen lataus (lataustapa 1)**

Tämä lataustapa on tarkoitettu pienitehoisten sähköajoneuvojen lataamiseen. Tavallista 230 V maadoitettua kotitalouspistorasiaa (Shucko) käytetään kevyen ajoneuvon laturin syötössä. Pistorasia tulee olla suojattu 30 mA vikavirtasuojalla. (SESKO, 2019)

### **3.3.2 Hidas lataus (lataustapa 2)**

Lataustavassa 2 laturia syöttää tavallinen 230 V kotitalouspistorasia tai teollisuuspistorasia. Vaikka kyseessä on 16 ampeerin pistorasia, on kokemukseräisesti huomattu, että se ei kestä nimellisvirrallaan jatkuvaa käyttöä. (SESKO, 2019) Standardin SFS-EN 62752 mukaan latausvirta tulee rajoittaa 8 ampeeriin kotitalouspistorasiasta ladattaessa. Näin ollen yksivaiheisena lataustehoksi saadaan 1,8 kW.

Sähköauton tyypillinen kulutus on luokkaa 10–15 kWh/100 km, joten yön yli kestäväällä latauksella (8 h) tällä lataustavalla kantamaa kertyisi noin 96–144 km. Lataustapa 2 on siis käytännöllinen näillä oletuksilla, jos päivittäinen ajosuorite on alle 96–144 km. (Motiva, 2020)

### **3.3.3 Peruslataus (lataustapa 3)**

Lataustavassa 3 laturia syötetään standardin SFS-EN 62196-2 mukaan tyypin 2 ajoneuvopistokkeesta, joka on suunniteltu sähköajoneuvojen lataamiseen. Tyypin 2 pistoke on esitetty kuvassa 3.1. Latausvirta voi olla maksimissaan 63 A. Myös pienemmät virrat ovat mahdollisia riippuen käytössä olevasta syöttötehosta. Maksimissaan latausteho voi olla 43 kW. Lataustapa 3 on suositelluin lataustapa. (SESKO, 2019)



Kuva 3.1 Tyypin 2 ajoneuvopistoke, jota käytetään peruslatauksessa. (Wikimedia Commons)

### 3.3.4 Teholataus (lataustapa 4)

Teholatausta kutsutaan myös pikalataukseksi. Tässä lataustavassa ajoneuvon akustoa syötetään suurella tasavirralla ulkopuolisesta laturista. Oltava SFS-EN 62196-2 mukainen tyypin 2 latauspistorasia, ajoneuvopistoke tai SFS-EN 62196-3 FF tasasähköpistoke, kuten kuvassa 3.2 esitetty CCS. Latausteho teholataukselle on luokkaa 22–150 kW. (SESKO, 2019)



Kuva 3.2 CCS-ajoneuvopistoke, jota käytetään teholatauksessa. (Wikimedia Commons)

### 3.4 Sähköautojen latausajat

Sähköautojen suuret akkukoot tarkoittavat myös suuren lataustehon lisäksi pitkiä latausajoja. Pitkien latausajojen vuoksi todennäköisyys tilanteille, joissa moni sähköauto on latauksessa yhdenaikaisesti kasvaa. Tosin latausaikaan vaikuttaa myös ajosuoritteen pituus, koska keskimäärin henkilö ei aja akkua täydestä tyhjään päivässä. Yhdenaikainen lataus nostaa kuormitustehoa, joka verkon täytyy pystyä toimittamaan.

Trafan vuoden 2017 tietojen mukaan Suomessa rekisteröidyillä henkilöautoilla ajettiin keskimäärin 14 000 km vuodessa. Päivittäiseksi ajosuoritteeksi tämän perusteella tulee 38,4 km/pv. (Tietotrendit, 2018) Käytetään tätä lukua latausajojen arvioinnissa. Sähköauton tyypillisen kulutuksen ollessa 10–15 kWh/100 km, voidaan tämän keskiarvolla laskea päivittäiseksi lataustarpeeksi noin 4,8 kWh (Motiva, 2020).

Lataustavalla 2 (1,8 kW) tämän energiamäärän lataamisessa kestää karkeasti laskettuna 2 tuntia ja 40 minuuttia. Lataustavassa 3 yleisesti saatavilla voi olla 3x16 A kolmivaihepistorasia, josta saatava teho on 11 kW. Tällä teholla lataus kestää noin 26 minuuttia.

Sähköauton lataus tällaisen ajosuoritteen jälkeen vastaa siis kestoltaan ja suuruusluokaltaan jo nykyisten kotitalouksien suuria kuormia, sähkökiuasta ja liettä. Kaikkien suurien kuormien samanaikainen käyttö johtaisi hyvin ylimitoitettuun verkkoon, asiakkaan tapauksessa sähköliittymään, joten latauksessa tulisi käyttää jo yhden asiakkaan kohdalla jonkinäköistä älyä tai automaatiota päällekkäisyyksien välttämiseksi.

### 3.5 Älykäs lataaminen

Kontrolloimattoman lataamisen sijaan lataaminen voidaan toteuttaa tavalla, joka huomioi verkon kuormituksen tilan ja tehonkuluttajan tarpeet, kuten sähköautojen tapauksessa sen, että auton akun tulee olla varattu johonkin ennalta määritettyyn aikaan mennessä. Tätä lataustapaa kutsutaan älykkääksi lataamiseksi. Älykkäällä lataamisella tarkoitetaan latausjärjestelmää, joka sisältää tietoliikenneyhteyden ajoneuvon, latauslaitteen ja latauspalvelun tuottajan välillä. (Virta, 2017)

Älykkäällä lataamisella pyritään ehkäisemään verkolle liian suurien tehopiikkien syntymistä, joiden kompensointi verkon kapasiteettia kasvattamalla johtaisi hyvin kalliiseen ylimitoitettuun verkkoon. Älykästä lataamista voidaan myös hyödyntää latausenergian hinnan optimoimiseen. Tämä tehonsäätö voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkemällä lataus ajoittain päälle tai pois, muuttamalla latausvirtaa tai siirtämällä latausajankohtaa. Useiden tutkimusten ja simulaatioiden mukaan verkon käyttöaste kasvaa laajasti sovelletun älykkään lataamisen myötä (Qian et al., 2011) (Zhang et al., 2012). Tämä tarkoittaa sitä, että keskiteho verkossa kasvaa, mutta huipputehot voivat pysyä entisellään.

Älykkäät latausjärjestelmät alkavat yleistyä kiinteistöjen tasolla, mutta esimerkiksi muuntopiirien tasolla kuormanhallintajärjestelmät eivät ole yleisiä. Vaikka kiinteistöt hallitsevat kuormiaan, se ei takaa sitä, että syöttävä pienjänniteverkko kestää alueen kasvaneen tehonkulutuksen. Käytännössä kiinteistökohtaiset älykkäät latausjärjestelmät voisivat johtaa useammin tilanteisiin, joissa muuntopiiriin liittyvät ottavat verkosta nimellistehonsa samanaikaisesti. Tällaisiin tilanteisiin verkkoa ei usein ole mitoitettu.

### **3.6 Älykkään lataamisen laaja soveltaminen**

Monet sähköautojen verkkovaikutuksien tarkasteluun muodostetut simulaatiot pyrkivät huomioimaan älykkään lataamisen mahdollisuudet verkkovaikutusten minimoimiseksi. Älykäs lataaminen on usein mallinnettu keskitetysti. Tämä tarkoittaa sitä, että jollain taholla on tieto alueen reaaliaikaisista kuormista ja tämä taho kykenee säätelemään tehoja halunsa mukaan. Näin sähköautojen lataaminen saadaan suoritettua verkon käytettävyyden kannalta optimaalisesti. Luonnollisesti tällainen taho voisi olla jakeluverkkoyhtiö, mutta nykyinen sähkömarkkinalaki ei salli tätä. Asiakas voi ottaa liittymäkokonsa mukaisen tehon verkosta eikä jakeluverkkoyhtiö saa tätä rajoittaa. Kuormanhallinta jakeluverkkoyhtiön toimesta vaatisi myös lakimuutoksen lisäksi asiakkaiden kannalta jonkinlaisen kannustimen kuormanhallintaan suostumiseen. Yksinkertaisimmillaan kannustin voisi olla edullisempi siirtohintatariffi asiakkaille, jotka suostuvat kuormanhallintaan. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta tällaisia älykkäitä keskitettyjä latausjärjestelmiä ei löytynyt todellisista käyttökohteista.

#### 4. LATAAMISTEHON KASVUN VAIKUTUKSET PJ-VERKOSSA

Lataamistehon kasvun vaikutuksia PJ-verkon käytettävyyteen kuvataan seuraavissa alaluissa. Verkon tehonsiirtokapasiteetti voi rajoittaa tehonkasvua, jännitteenalenema voi aiheuttaa sähkönlaadun ongelmia sekä kasvanut teho voi aiheuttaa häviökustannuksia, jotka voivat olla perustana komponenttivaihdolle.

##### 4.1 Tehonsiirtokapasiteetti

Pienjänniteverkon tehonsiirtokyvyn sanelee jakelumuuntajan sekä verkon johdinten ja pienempien komponenttien mitoitus. Yleensä 20/0,4 kV jakelumuuntajat on hieman ylimitoitettu, jotta kuormituksen kasvulle saadaan pelivaraa. (Tikka, 2010)

Muuntajaa voidaan kuitenkin ajoittain ylikuormittaa taulukon 4.1 mukaisesti. Tämä johtuu siitä, että muuntajan käyttöikä on perusteltu siten, että muuntaja kestää käyttöiän pituisen ajan jatkuvalla nimelliskuormalla, kun jäähdytysilma on +20 °C. Muuntajan kuorma todellisuudessa vaihtelee, joten sitä voidaan ylikuormittaa lyhyitä aikoja ilman, että käyttöikä kärsii. Ylikuorma ei saa kuitenkaan ylittää 50 %:ia nimellistehosta ( $1,5 \times S_N$ ) ja käämin kuumimman pisteen lämpötila ei saa ylittää +140 °C. Kaapeleiden kuormitettavuus voi tulla myös ongelmaksi lataustehon kasvaessa. Verkostosuosituksessa SA 2:08 kaapeleille on määritetty myös omat ylikuormituskertoimet, kuten muuntajille. (SA 2:08, 2003) Ylikuormituskertoimista voidaan nähdä se, että muuntamotyypit ja alueet vaikuttavat tehonsiirtokapasiteettiin, joka taas vaikuttaa verkon lataamistehon kasvun kestävyyskykyyn.

Taulukko 4.1 Jakelumuuntajien ylikuormituskertoimia (SA 2:08, 2003)

Muuntopiiri	Pylväsmuuntamo	Puistomuuntamo	Kiinteistömuuntamo
Pientaloalue, sähkölämmitys	1,5	1,4	1,2
Kerrostaloalue	1,5	1,4	1,2
Keskusta-alue	1,4	1,3	1,0
Teollisuusalue	1,4	1,3	1,0
Maaseutualue	1,5	1,4	1,2

Sähköautojen lataamisen myötä muuntopiireissä huipputehot kasvavat, joten muuntajien tehonsiirtokapasiteetti voi ylittyä sallitusta ylikuormitettavuudesta huolimatta. Tikka (2010) tutki pikalataamisen verkkovaikutuksia simuloimalla Keravan energia Oy:n verkossa mm. pienjänniteverkon muuntopiirejä. Jo 25 % levinneisyysasteella taajamamuuntopiirin 500 kVA jakelumuuntajan havaittiin olevan 100 % ylikuormassa. Haja-asutusalueen muuntopiireissä havaittiin samanlaista käyttäytymistä. Huomion arvoinen asia simuloinnista on, että se ei huomioinut älykästä lataamista.

## 4.2 Jännitteenalenema

Jännitteenlaatu on tärkeä sähkökuluttajalle, koska jännitetasolla voi olla vaikutus verkkoon kytketyn laitteen toimintaan. Jännitteenalenema on suurimmillaan johdon loppupäässä, kun kuormitus on huipussaan. (Lakervi, 2008) Sähkön laatustandardin SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa jokaisen viikon aikana 95 % jännitteen tehollisarvojen 10 min keskiarvoista täytyy olla välillä  $U_n \pm 10\%$ . Jakelujännitteen arvojen tulee pysyä välillä +10- ja -15 %.

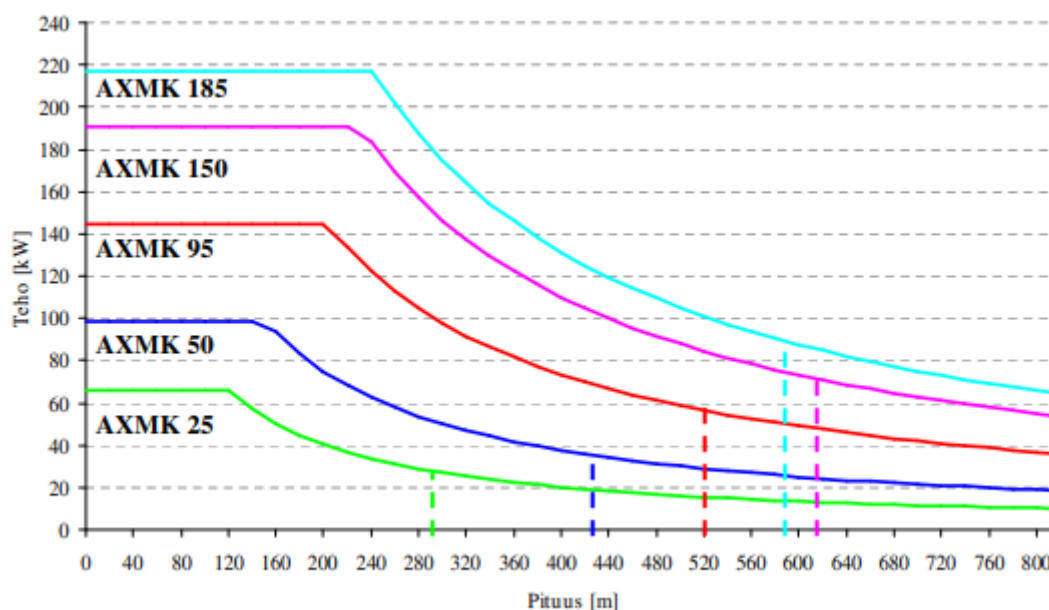
Jännitteenalenema pienjänniteverkon johdoissa voidaan laskea seuraavasti

$$U_{h\%} = \frac{P}{U^2} \cdot (R + X \cdot \tan(\varphi)) \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

jossa  $U_{h\%}$  on johdon jännitteenalenema prosenteissa,  $P$  teho,  $U$  jännite,  $R$  resistanssi,  $X$  reaktanssi ja  $\varphi$  tehokulma. (Lakervi, 2008)

Sähköautolataamisen vuoksi verkossa huipputeho kasvaa, joten verkossa jännitteenalenema kasvaa yhtälön (4.1) mukaisesti. Jännitteenalenema kasvaa myös jakelumuuntajissa tehon kasvaessa.

Jännitteenaleneman vaikutus johtojen tai kaapelien käytettävyyteen voidaan havainnollistaa piirtämällä kuvaaja, jossa kaapelin tai johdon kuljettama maksimiteho muuttuu pituuden funktiona. Kuvassa 4.1 näkyy eri pienjännitekaapelien sähkötekniset käyttöalueet. Vaaka-suora osuus kuvaa termisen kuormitettavuuden rajaa ja pystysuora katkoviiva syötön nopean poiskytkennän vaatimusten rajaa. Kaareva osuus kertoo, kuinka jännitteenaleneman vuoksi tehonsiirtokapasiteetti rajoittuu, kun kaapelin pituus kasvaa. (Simonen, 2006)



Kuva 4.1 AXMK-kaapelien sähkötekniset käyttöalueet 6.9 % jännitteenalenemalla. Poiskytkentäehdot riippuvat muuntajakoosta. (Simonen, 2006)

Kuvasta 4.1 voidaan nähdä, kuinka johtimen poikkipinta-alan kasvattaminen kasvattaa tehonsiirtokapasiteettia. Kaapelipituuden kasvaessa jännitteenaleneman vuoksi tehonsiirtokapasiteetti pienenee.

Aikaisemmin luvussa 4.1 esille tuodussa Tikan (2010) diplomityössä tutkittujen verkkojen suurimmat jännitteenalenemat ennen sähköautoja olivat 3–4 % suuruusluokkaa. 25 % levinneisyysasteella yli puolella keskijännitejohtolähdöistä jännitteenalenema nousi yli 5 %:n. Pienjänniteverkon tietyissä osissa jännitteenalenema nousi jopa yli 10 prosenttiin.

### 4.3 Häviökustannukset

Tehon kasvu verkossa kasvattaa myös tehohäviöistä aiheutuvia kustannuksia. Kasvat häviökustannukset voivat olla kannustin johdinvaihtoon. Suuremmalla johtimen poikkipinta-alalla häviökustannukset laskevat, koska johtimen resistanssi pienenee. Johtimien vaihto on kannattava, kun epäyhtälö (4.2) toteutuu

$$K_{h1} - K_{h2} > \varepsilon \cdot K_{vaihto}, \quad (4.2)$$

jossa  $K_{h1}$  nykyisen johdon seuraavan vuoden häviökustannukset,  $K_{h2}$  verrattavan suuremman poikkipinta-alan johtimen seuraavan vuoden häviökustannukset,  $K_{vaihto}$  johdinvaihdosta aiheutuvat kustannukset ja  $\varepsilon$  annuiteettikerroin.

Epäyhtälöstä on mahdollista johtaa taloudellinen rajateho, jolla johdinvaihto on kannattava. (Lakervi, 2008) Taloudellisen rajatehon yhtälö (4.3)

$$S_1 \geq U \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot K_{vaihto}}{c_h \cdot (r_{A1} - r_{A2})}}, \quad (4.3)$$

jossa  $U$  on käyttöjännite,  $c_h$  häviökustannus ja  $r_{A1}$  ja  $r_{A2}$  tarkasteltavien johdinten resistanssit.

Yhtälöissä (4.2) ja (4.3) käytetty annuiteettikerroin  $\varepsilon$  saadaan yhtälön (4.4) avulla

$$\varepsilon = \frac{\frac{p}{100}}{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^t}}, \quad (4.4)$$

jossa  $p$  on laskentakorkokanta ja  $t$  pitoaika.

Usein johdinvaihto voi olla taloudellisesti kannattava jo huomattavasti ennen, kuin johtimen terminen kuormitettavuus tulee vastaan. (Lakervi, 2008)

Yhtälöiden avulla voidaan laskea taloudellinen rajateho esimerkiksi muuntamolta lähtevälle runkokaapelin AXMK 4x185 vaihdolle AXMK 4x240:een. Sähköautojen kasvava määrä muuntopiirin asiakkailta voisi johtaa tällaiseen kaapeli vaihtoon.

Laskentaparametrit ja taloudellinen rajateho on esitetty taulukossa 4.2. Taloudellinen rajateho on näillä parametreilla alle kaapelin termisen kuormitettavuuden (330 A, 228 kVA). Huomataan, että kaapelin läpi kulkevan keskitehon ylittäessä 143,6 kVA vaihto on häviökustannusten näkökulmasta kannattava. Todellisuudessa verkkoyhtiöillä on tavallisesti käytössä vain muutamaa eri johdinpoikkipinta-alaa, joista taloudellisin valinta on tehtävä (Lakervi, 2008).



Taulukko 4.2 AXMK 4x185 kaapelin vaihto AXMK 4x240, taloudellinen rajateho.

$t$ [a]	$p$ [%]	$c_h$ [€/W,a]	$K_{\text{vaihto}}$ [€/km]	$S_I$ [kVA]
45	5	0,12	11 000	143,6

#### 4.4 Päivittäinen lataaminen ja vuorottelu

Luvussa 3.4 esitettiin yhden sähköauton keskimääräisen päivittäisen latausenergiantarpeen olevan noin 4,8 kWh. Energiantarve ei ole nykyiseen päivittäiseen kulutukseen verrattuna suuri. Esimerkiksi saunan lämmittäminen kuluttaa lähes saman määrän energiaa. Energiaa merkittävämpi asia verkon kannalta on kuitenkin teho. Sähköauton latausteho voi olla riippuen lataustavasta luokkaa 2–11 kW, kun taas kiukaan teho on tyypillisesti noin 6–8 kW. Sähköautolataaminen eroaa kiukaista erityisesti kuitenkin siinä, että lataamisen kuormaa voidaan rajoittaa helpommin. Kiinteistöissä on tyypillistä vuorotella kuormia, kun kiuas laitetaan päälle, jotta vältetään pääsulakkeiden ylikuormitukselta. Suuritehoisten latureiden kohdalla tulisi myös toimia niin, että lämmityskuormaa kytketään pois käytöstä auton latautuessa. Kuormien vuorottelu johtaa tilanteeseen, jossa yksittäisen asiakkaan aiheuttama tehopiikki muuttuu vain vähän, mutta energiankulutus kasvaa. Vuorottelu lisää siis vuosienergian ja kuormitusmallien pohjalta suoritettujen simulaatioiden uskottavuutta. Sähköauton lataaminen on kuitenkin monille päivittäinen toimenpide, joka voi kerrostua muiden verkoon liittyvien lataus- ja peruskuorman kanssa. Vuorottelu ei myöskään ole kaikissa kiinteistöissä mahdollista, koska lämmitysmuotoja on erilaisia. Nämä voivat aiheuttaa perinteisillä kuormitusmalleilla mitoitetuille verkoille ongelmia.

## 5. PIENJÄNNITEVERKON SIMULAATIOT

Pienjänniteverkosta on vaikea muodostaa yleistä verkkoa, jota tarkastelemalla voisi todeta, miten sähköautojen määrän kasvu näkyy verkossa. Tämän vuoksi lataamisvaikutuksia tutkitaan usein, jossain tietyssä, jo olemassa olevassa verkossa. Simulointi vaatii useita oletuksia tulevaisuudesta sekä tarkkoja parametrivalintoja. Epävarmuutta esiintyy esimerkiksi kuormituksen kasvun suuruuteen, lataustarpeen ajankohtaan, paikkaan ja määrään liittyen. Laskennalla pyritään määrittämään tietyllä varmuudella verkon kannalta hankalin tilanne, joka aiheutuu sähköautojen lataustehon lisääntymisestä. (Tikka, 2010)

### 5.1 Laskentaparametrit

Laskentaparametrien huolellinen valinta on erittäin tärkeää tulosten uskottavuudelle. Sähköautojen lataamisen verkkovaikutuksien simulointiin määritettäviä parametrejä ovat muun muassa:

- Sähköautojen levinneisyysaste ja määrä taloudessa
- Päivittäinen ajosuorite ja sen mukaan ladattava energiamäärä
- Latausteho
- Latauksen paikka ja aika (esim. kotona/työpaikalla)
- Mahdollinen älykäs lataaminen

Parametrejä lisäämällä simulaatio voidaan saattaa vastaamaan todellisuutta paremmin, mutta samalla simulointiprosessi voi monimutkaistua sekä parametrivalintojen virheet voivat kasvaa.

### 5.2 Simulaatiotavat

Diplomityössään *Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset*, 2010, Tikka esittää kolme tapaa toteuttaa verkkosimulointi. Muokkaamalla tunnettuja kuormitusmalleja ja asiakaskoh-  
taisia päiväenergioita siten, että niihin lisätään sähköauton lataamisen kuorma, jonka suuruus tietyillä ajanhetkillä tiedetään, voidaan simuloinnissa huomioida kuormituksen käyttäytymisen. Verkkotietojärjestelmän avulla suoritettavassa simulaatiossa asiakkaiden kanssa samaan solmupisteeseen voisi asettaa uuden kuormituspisteen. Menetelmä olisi tarkka, mutta käytännössä suurien asiakasmäärien kanssa työläs. Simulointi voitaisiin suorittaa myös to-

dellisen asiakaskohtaisen mitatun tuntidatan pohjalta. Tällä tavalla pystyttäisiin luomaan todellisuutta vastaava muuntopiiri. Koska simulaatio perustuu mitattuun dataan, jäisi ainoastaan latauskuorma epävarmuustekijäksi.

### 5.3 Simulaatiotuloksia

Useat tutkimukset ovat osoittaneet latausprofiilien avulla simuloimalla, että kontrolloimaton sähköajoneuvojen lataaminen on haitallista jakeluverkon toiminnan kannalta. Jotkin tutkimukset ovat osoittaneet komponenttien kuormitettavuuden ja jännitteenaleneman muodostuvan ongelmaksi 50 %:n sähköajoneuvojen levinneisyysasteella. (Sharma et al., 2014) (Masoum, 2012) Yksi tutkimus esitti, että jo 25 %:n levinneisyydellä sähköajoneuvot voisivat aiheuttaa merkittävää jännitteenalenemaa (Mu et al., 2014).

De Hoog et al. (2015) simuloivat todellista verkkoa (Melbourne, Australia), jossa käytettiin aitoa ajo- ja kuormitusdataa. Optimoitua lataamista käyttäen huomattiin, että verkko kykenee kannattelemaan suuriakin, jopa 80 %:n osuutta autokannasta ilman verkkoinfran päivittämistä. Kontrolloimaton lataaminen johti jo vain 10–15 %:n levinneisyysasteilla verkko-ongelmiin. Simulointi keskittyi jakeluverkkotasolle ja jatkossa työryhmä aikoo miettiä, kuinka tuloksia voisi yleistää pienjänniteverkon tarkasteluun.

Richardson et al. (2011) mukaan suuret sähköautojen levinneisyysasteet aiheuttavat merkittäviä vaikutuksia jakeluverkoissa. Jos lataaminen tapahtuu kontrolloimatta, tällä voisi olla suuria infran päivitys vaikutuksia. Jakeluverkkoyhtiön kautta tapahtuva lataamisen kontrollointi voisi mahdollistaa sen, että verkko pystyisi ylläpitämään suurta sähköautokantaa.

Quirós-Tortós et al. (2016) tutkivat sähköautojen levinneisyysasteen ja eri latausalgoritmien vaikutuksia kahdessa todellisessa jakeluverkossa Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Tuloksien perusteella verkko-ongelmia voi ilmetä jo 20 %:n levinneisyysasteella, mutta keskitetyn latausalgoritmin avulla kyettiin välttämään verkko-ongelmat jopa 100 %:n levinneisyysasteella.

Verzijlbergh et al. (2011) tutkivat sähköajoneuvojen lataamisvaikutuksia jakeluverkoissa. Analyysi perustui todelliseen dataan ajotavoista ja monista eri sähköverkoista. Tuloksien

perusteella 75 % sähköautojen levinneisyysasteella, vuonna 2040, merkittävä osa jakelumuuntajista olisivat ylikuormitettuja. Kaapeleiden kuormitus tai jännitteenalenema eivät näyttäytyneet niin suurena ongelmana. Simulaatioiden perusteella täydellinen lataamisen optimointi voisi vähentää ylikuormittuneiden muuntajien määrää noin 25 %:lla sekä 8- ja 2 %:lla kaapeleiden määrää kuormituksen ja jännitteenaleneman vuoksi.

Rautiainen käsittelee julkaisussa *Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids*, 2015, aikaisemman julkaisunsa tuloksia. Julkaisussa on mallinnettu ladattavien hybridien latausvaikutuksia tarkastelluissa todellisissa kaupunkijakeluverkoissa. Kaupunkiverkossa huomattiin, että verkko kestää kasvaneen lataustehon melko hyvin, mutta kuormien hallintaa suositeltiin, jotta tietyissä tapauksissa verkkovaikutuksia pystyttäisiin rajoittamaan. Maaseutuverkossa suoritettut simulaatiot osoittivat myös samaa.

Richardson et al. (2012) vertailivat keskitetyn ja asiakaskohtaisen älykkään lataamisen verkkovaikutuksia keskenään. Simuloitu verkko oli todellinen pienjänniteverkko Irlannissa. Huomioitavaa tässä verkossa on se, että asiakkaille sähköjakelu tapahtuu yksivaiheisen liittymän kautta. Asiakaskohtaisessa älykkäässä lataamisessa (Local Control Charging, LCC) sähköautojen laturit pyrkivät toimimaan itselleen mahdollisimman edukkaasti ladataan akun täyteen ohjaussignaalin perusteella, joka tuli jakelumuuntamolta. Muuntopiiriin laturit eivät olleet yhteydessä toisiinsa, mutta saivat jakelumuuntamolta signaalin, jonka avulla verkko pysyi käytettävänä. LCC:tä verrattiin tilanteisiin, jossa sähköautoja ei ollut ollenkaan ja siihen, kun sähköautojen lataamista ohjattiin keskitetysti jakeluverkkoyhtiön toimesta. Simulaatiot suoritettiin 50 % levinneisyysasteella. LCC kykeni toimittamaan lähes saman määrän energiaa akkujen lataamiseen, kuin keskitetty lataaminen, mutta verkossa ilmeni suurempaa jännitteenalenemaa, joka ylitti sallitun rajan. Keskitetty lataaminen toimi verkon sallimissa rajoissa. Tutkijoiden mukaan tarkempien lähtötietojen avulla LCC:n suorituskykyä voisi parantaa. LCC:n implementointi olisi huomattavasti helpompaa, kuin keskitetyn lataamisen. Tutkijoiden mukaan LCC voisi toimia hyvin pienillä levinneisyysasteilla ja keskitettyä lataamista voisi alkaa soveltamaan vasta, kun suuremmat levinneisyysasteet ovat todellisia.

Jos sähköautojen lataamista ei kontrolloida millään älykkäällä latausjärjestelmällä tai kuluttajilla ei ole mitään kannustimia vähentää huippukuormia, aiheuttaa tämä suuria tehopiikkejä jo pienillä sähköautojen osuuksilla koko autokannasta, jos lataaminen tapahtuu huippukuorman aikaan. Verkko ei nykyrakenteeltaan kestäisi tällaisia tehopiikkejä, joten kuormien

hallinta on välttämätöntä. Kuitenkin simulointien perusteella, kun kontrolloimaton lataaminen tapahtuu huippukuorma-ajan ulkopuolella, verkko kestää sen ja käyttöaste jopa paranee. Täytyy huomioida, että simuloinnit suoritettiin 0 %, 10 % ja 20 % levinneisyysasteilla. Älykäs lataaminen saavutti parhaan tuloksen tehopiikkien minimoinnin kannalta. (Qian et al., 2010) Levinneisyysasteet voivat olla kuitenkin riippuen muuntopiiristä tulevaisuudessa huomattavasti suurempia ja näissä tilanteissa kuormien hallinnan merkitys kasvaa erityisesti.

#### **5.4 Spot-hintaohjattu lataaminen**

Sähköautojen omistajien intresseissä on yleensä ladata ajoneuvo mahdollisimman edullisesti. Tähän tarkoitukseen sähköauton omistajat saattavat hankkia niin sanottuja Spot-sähkösovimuksia, joissa sähkön hinta vaihtelee sähkön markkinahinnan mukaan tunneittain. Edullisen sähkön tuntina älykäs lataamisjärjestelmä voi päättää ladata auton akkua ja lopettaa lataamisen, kun sähkön hinta kallistuu järjestelmän mielestä liikaa. Spot-ohjattu lataaminen voi kuitenkin olla verkon kannalta epäedullinen asia, sillä se voi johtaa tilanteisiin, jossa verkkoon kytkeytyy ajoittain suuria latauskuormia päällekkäin (Mahat, 2012). Tämän ilmiön vaikutuksia voidaan tarkastella simulaatioiden avulla, jotka keskittyvät spot-hinta ohjatun lataamisen verkkovaikutuksiin.

Liu et al. (2014) suorittivat simulaatioita sähköautojen lataamistehon kysynnän selvittämiseksi todellisen ajodatan perusteella pohjoismaissa. Ajodata oli saatu kansallisten matkakyselyiden avulla. Yhtenä simulaatiomenetelmänä oli tutkia, kuinka Spot-hintaohjattu lataaminen vaikuttaa lataamistehoon verkossa. Spot-ohjattu lataaminen aiheutti tutkimuksen mukaan suuria tehopiikkejä edullisten sähkön tunteina, jotka sijoittuivat yöaikaan. Kuitenkin 50 % sähköautojen levinneisyysasteella Suomessa tehopiikki oli noin 13 % suurempi, kuin mitä huippukuorma ilman lataamista oli kello 19 illalla. Tämä johtui siitä, että yöaikaan verkosta otettu teho on verrattain pientä, joten lataamisesta syntynyt tehopiikki ei kerrostuessaan pohjakuorman päälle aiheuttanut suurta ylikuormittumista. Tässä on kuitenkin huomioitava se, että tulos oli saatu 50 % levinneisyysasteella ja oletuksena oli, että edullinen Spot-hinta ilmenee öisin. Muuntopiireissä, joissa on paljon sähkölämmityskuormaa voi esiintyä suurta kulutusta myös öisin.

De Hoog et al. (2015) simuloivat sähköautojen lataamisen verkkovaikutuksia erilaisilla lataus tyypeillä, joista yksi oli Spot-hintaan perustuva menetelmä, jossa latausjärjestelmä pyrki

minimoimaan ladatun energian hinnan. Simulaatio suoritettiin todelliselle verkolle Melbournea, Australiassa, jossa asiakasliittymiä oli 114 kpl ja verkkoa syötti 100 kVA jakelumuuntaja. Tutkimuksessa havaittiin, että Spot-hinta ohjattu järjestelmä mahdollisti  $-10\%$  säästön ladatun sähköenergian hinnassa.  $50\%$  sähköautojen levinneisyysasteella verkossa ei havaittu tehopiikkien aiheuttamia ongelmia, sillä edulliset tunnit esiintyivät yöllä, jolloin pohjakuorma oli suhteellisen pientä.

Mahat et al. (2012) selvittivät simulaation avulla, kuinka Spot-hintaohjatut latausjärjestelmät kuormittavat verkkoa. Simulaatio suoritettiin mallintamalla todellinen verkko, joka sijaitsi Tanskassa. Simulaatio suoritettiin  $25\%$ :n sähköautojen levinneisyysasteella. Edullisimmat Spot-hinnat esiintyivät simulaatiossa kello 3–4 aikaan aamuyöllä. Simulaatiossa huomattiin jakelumuuntajan olevan noin  $200\%$ :n ylikuormassa edullisimman tunnin aikana. Myös jännitteenalenuma verkossa kyseisen tunnin osalta ylitti sallitun. Tutkijoiden mukaan jakelumuuntaja oli mitoitettu tanskalaisille muuntajille tyypilliseen tapaan, joissa tavallinen huipukuormatunti kuormittaa muuntajaa noin  $50\text{--}60\%$  sen maksimikapasiteetista.

## 5.5 Simulaatiotulosten analysointi

Simulaatiot kertovat jo pientenkin sähköautojen levinneisyysasteiden aiheuttavan verkolle ongelmia, kun lataamista ei kontrolloida. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta pohjoismaisissa verkoissa suoritettuja simulaatioita löytyi vain vähän, joita tässä työssä olisi voinut hyödyntää. Simuloidut verkot sijaitsivat pääasiassa Britteinsaarilla ja ne tutkivat pienjänniteverkon lisäksi usein myös keskijänniteverkkoa. Pelkästään pienjänniteverkkoon keskittyneitä simulaatioita ei ollut monia, joten myös keskijänniteverkon simulaatiot otettiin tarkasteluun, koska keskijänniteverkon käytettävyys on myös pienjänniteverkon käytettävyyden kannalta oleellista. Laskentaparametrit sekä lataamisen toteutustavat vaihtelevat paljon simulaatioiden välillä. Keskitetty älykäs lataaminen mahdollisti monien simulaatioiden mukaan suuremman sähköautojen levinneisyysasteen verkossa, kuin kontrolloimaton lataaminen.

Simulaatioiden mukaan Spot-hinta ohjatut latausjärjestelmät siirtävät lataustehoa yölle, jolloin kuormitus verkossa on suhteellisen pientä. Edulliset Spot-hinta tunnit voivat kuitenkin aiheuttaa suuria tehopiikkejä verkossa, kun useat latausjärjestelmät pyrkivät optimoimaan latausenergian hinnan. Simulaatiot antoivat ristiriitaisia tuloksia, joten verkon kestävyysanalysointi pelkästään niiden pohjalta on haastavaa.

Simulaatiotulosten yleistäminen suomalaisiin pienjänniteverkkoihin voi olla haasteellista, sillä simuloitujen verkkojen mitoitusperiaatteita tulisi vertailla suomalaisiin mitoitusperiaatteisiin. Myös keskijänniteverkon tarkastelu ja sen pohjalta johtopäätösten teko pienjänniteverkon infran riittävydestä ei välttämättä anna oikeaa kuvaa pienjänniteverkon tilasta.

## **6. TEHONKASVUN MERKITYS VERKKOYHTIÖLLE JA ASIAKKAALLE**

Tehonkasvu verkossa tulee simulaatiotulosten perusteella aiheuttamaan toimenpiteitä verkko-yhtiöille ja asiakkaille. Lataustehon kasvu aiheuttaa saneeraustoimenpiteitä ainakin jo nykyisen kuorman aikana heikon jännitejäykkyyden verkoissa tai verkoissa, joissa kapasiteetti on muuten jo lähes täysin käytössä. Laajemmassa kuvassa pienjännite- ja keskijännitejake-luverkkoja tulisi saneerata vastaamaan kasvavia huippukuormia.

Sähköautoilun yleistyessä sähköliittymäkokojen suurentaminen saattaa myös yleistyä, kun sähköauton omistajat haluavat parantaa latausnopeuttaan ja välttää kuormien vuorottelua. Liittymäkoon suurentaminen voi myös tulla ajankohtaiseksi kerrostalokiinteistöille, jos parkkipaikalle tai -halliin rakennetaan useampia latausasemia. Korjausrakentamisbarometrin mukaan 32 % keväällä 2020 kyselyyn vastanneista taloyhtiöistä ilmoitti toteuttavansa latauspisteen tai -pisteiden rakentamisen alkaneella viisivuotisjaksolla. Latauspisteiden rakentaminen oli noussut yleisimmäksi korjaushankkeeksi. (Kiinteistöliitto, 2020) Tämä ei kuitenkaan suoraan kieli liittymäkokojen muutostarpeesta, sillä yksittäiset latausasemat ovat yleensä kiinteistön kokoon verrattuna pienitehoisia. Sähköautojen levinneisyysasteen kasvaessa nämä yksittäiset latauspaikat eivät kuitenkaan tule tyydyttämään latauksen kysyntää, jolloin lisärakentamisen ehtona voi olla liittymäkoon suurentaminen.

### **6.1 Verkkoon liittyminen ja liittymäkoon suurentaminen**

Pienjännitesähköliittymän tehonsiirtokapasiteetin ja hinnan määrittää pääsulakekoko. Ensimmäistä kertaa jakeluverkkoon liitettävältä kohteelta peritään myös liittymismaksu. Liittymismaksuun sisältyy jakeluverkkoon liittäminen ja energiamittarin käyttöönotto. Liittymismaksun perustana on se, että sillä katetaan rakennuskustannukset liittymiskohtaan. Liittymiskohta sijaitsee useimmiten liitettävän kohteen tontin tai rakennuspaikan rajalla. Sopiva liittymäkoko määritetään odotetun kulutuksen perusteella.

Sähköliittymät ovat Suomessa kotitalouksille useimmiten kolmivaiheisia 230 V pienjänniteliittymiä. Yksivaiheinen pienliittymä on myös esimerkiksi Carunan alueella mahdollinen, jos tehontarve on enintään 500 wattia (Caruna, 2018). Sähköliittymää voi suurentaa yksivaiheisesta kolmivaiheiseksi tai kolmivaiheisen liittymän sulakekokoa voi kasvattaa. Verkkoyhtiöillä on näille toimenpiteille omat hinnastonsa lisäliittymismaksun muodossa.



## 6.2 Verkkoyhtiön näkökulma

Verkkoyhtiölle lataamistehon kasvu tarkoittaa heikkojen verkonosien vahvistamista sähkönlaadun sekä verkkokomponenttien kestävyuden vuoksi. Jotta verkkoyhtiö välttyisi verkon liialliselta vahvistamiselta, tulisi asiakkaiden tulevaisuuden kulutuskäyttäytyminen tuntea sekä pyrkiä kannustamaan tehopiikkien syntymisen minimoimista. Tehopohjainen siirtotariffi, jossa laskutuksen perustana on esimerkiksi vuoden tai kuukauden huipputeho voisi olla yksi keino kannustaa asiakkaita tehopiikkien välttämiseen.

Verkkoyhtiöllä on liittämisvelvollisuus, joka takaa tasapuolisen mahdollisuuden liittyä verkkoon kohtuullista korvausta vastaan. Verkon riittämätön tehonsiirtokapasiteetti ei voi olla este asiakkaan liittämiseksi, mutta liittymän toimitusaikaan se voi vaikuttaa. Verkkoyhtiö voi periä liittymisestä tai liittymän muutoksesta kohtuullisen liittymismaksun. Jakeluverkoissa noudatettavat hinnoitteluperiaatteet ovat vyöhykehinnoittelu, aluehinnoittelu ja tapauskohtainen hinnoittelu. Hinnoitteluperiaate riippuu lähinnä siitä, onko liittymän lähistöllä olemassa muuntamo vai tuleeko muuntopiiri rakentaa. Liittymismaksu perustuu sähköverkon laajentamisesta aiheutuviin keskimääräisiin kustannuksiin ja laskennalliseen kapasiteettivarausmaksuun. Kapasiteettivarausmaksu pyrkii kattamaan sähköliittymien keskimääräiset verkonvahvistustarpeet. Kapasiteettivarausmaksu kuvaa kustannusta, jonka yhden tehoyksikön lisääminen olemassa olevaan verkkoon aiheuttaa. (ESE, 2020)

Verkkoyhtiön kannalta liittymäkokojen suurentamisen ei tulisi aiheuttaa taloudellista haittaa, jos verkon vahvistustoimet suoritetaan kustannustehokkaasti, koska liittymismaksussa pyritään huomioimaan tehonkasvun verkkovaikutukset.

## 6.3 Asiakkaan näkökulma

Asiakkaan näkökulmasta tehonkasvu verkossa saattaa ilmetä jännitteenlaadun ongelmina. Näiden ongelmien korjaamiseen vaaditut investoinnit voivat puolestaan näkyä siirtotariffissa, joko tariffihinnan tai -rakenteen muutoksena. Tehopohjaisen tariffin kanssa asiakkaalla olisi suurempi mahdollisuus vaikuttaa siirtolaskunsa suuruuteen. Vainiala (2019) huomasi tutkiessaan tehopohjaisen tariffin vaikutuksia Porvoon Sähköverkossa, että tehotariffin implementointi ei muuttanut asiakkaiden kokonaisenergian kulutusta oleellisesti. Vainialan mielestä tehotariffi tulee vähentämään kuluttajien huipputehoja sekä parantamaan kuluttajan omaa vaikuttamiskykyä sähkön hinnan muodostumisessa.

Asiakkaan kannalta liittymäkoon kasvattaminen näyttäytyy lisäliittymismaksuna sekä riippuen verkkoyhtiöstä mahdollisesti siirtotariffin perusmaksun korottumisena. Liittymisjohdon sekä pää- tai mittauskeskuksen soveltuvuus uuteen liittymään on tarkastettava. Liittymisjohdon muutostyöt voivat myös olla suuri kuluerä asiakkaalle.

Lassila et al. (2010) mukaan sähköautojen yleistymisellä voi olla laskevia tai kasvattavia vaikutuksia siirtohintoihin. Siirtohintojen muutos riippuu verkon investointitarpeen suuruudesta, joka riippuu kasvaneesta tehon tarpeesta sekä sähköautojen myötä kasvaneesta energian kulutuksesta.

#### **6.4 Verkkosaneeraamisen kustannukset**

Yleisen tason saneerauskustannuksia pienjänniteverkossa on hankala arvioida, koska verkot poikkeavat toisistaan paljon. Verkko on usein taajamissa kaapeloituna asfaltin alla, jolloin johdinvaihtojen kustannukset ovat katujen avaamisen vuoksi suuremmat, kuin maaseudulla, jossa kaapelin kaivuu on helpompaa. Saneerauskustannusten arviointi on siis tehtävä aina tapauskohtaisesti. (Tikka, 2010)

Tikan (2010) suorittamien pienjänniteverkkosimulaatioiden mukaan suurilla sähköautojen levinneisyysasteilla verkon saneeraus tarkoittaisi lähes koko pienjänniteverkon uudelleen rakentamista. Muuntajakapasiteettia tulisi kasvattaa vaihtamalla muuntajia suurempi kokoiisiin sekä johtimia tulisi vaihtaa kuormitettavuuden ylittymisen vuoksi. Myös jännitteenalenema johtaisi johtimien vahvistamiseen. Tikka arvioi 50 %:n sähköautojen levinneisyysasteen johtavan tutkitussa verkossa saneerauskustannuksiin, jotka ovat samaa luokkaa pienjänniteverkon jälleenhankinta-arvon kanssa. Taajamamuuntopiirissä kustannukset asiakasta kohti olivat huomattavasti pienemmät, kuin haja-asutusalueen muuntopiirissä. Simulaatiot ja kustannusarviot eivät ottaneet huomioon älykkään lataamisen vaikutuksia missään muodossa.

Lassila et al. (2010) tutki hitaan latauksen (3,6 kW) vaikutuksia jakeluverkossa, jonka jälleenhankinta-arvo oli 50 M€ ja vuosittainen verkon siirtämä energiamäärä 200 GWh. Sähköautojen arvioitu yhteenlaskettu vuosittainen energiankulutus oli noin 46 GWh, joka olisi noin 19 % koko jakeluverkossa siirretystä energiasta. Lassila et al. arvioi 100 %:n sähköau-

tojen levinneisyysasteen aiheuttavan riippuen lataustavasta noin 0–20 M€:n investointitarpeen (0–1060 k€/a), joka olisi 0–1800 € verkon asiakasta kohden. Hitaan latauksen 100 %:n levinneisyysaste ei todellisuudessa ole kovin todennäköistä, sillä latausajat olisivat epäkäytännöllisen pitkiä. Todellisessa tilanteessa lataamistehot olisivat suurempia, joten euromääräinen investointitarve olisi myös suurempi.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Verkkosimulaatioiden perusteella vaikuttaa siltä, että jo pienet sähköautojen levinneisyysasteet tulevat aiheuttamaan pienjänniteverkolle ongelmia kontrolloimattomasti ladattuina. Simulaatioiden perusteella saneeraustarvetta tulee esiintymään muun muassa muuntajien, johtimien termiseen kuormitettavuuteen ja jännitteenalenemaan liittyen. Saneerauskustannuksiin kantaa ottaneet Lassila et al. (2010) ja Tikka (2010) mukaan kustannukset ovat verkon jälleenhankinta-arvoon verrattuna suuria.

Tutkimuskysymyksiin vastaten verkko kestää kontrolloimattomalla lataamisella heikosti sähköautojen yleistymisen ja verkkosaneeraamista on tehtävä laajasti. Monet simulaatiot osoittivat kuitenkin, että verkkosaneeraaminen voidaan lykätä tai jopa kokonaan välttää käyttämällä keskitettyä älykästä lataamista. Keskitetystä älykkästä lataamisesta ei löytynyt todellisen maailman käyttökohteita, mutta sen mahdollisen implementoinnin tutkiminen vaikuttaa kannattavalta huomioiden sen suuret säästöt verkkosaneerauskustannuksissa.

Tämä työ ei anna tarkkoja lukuarvoja pienjänniteverkon kestävydestä, sillä jokainen verkko eroaa toisistaan ja simulaatioita tulisi suorittaa aina verkkokohtaisesti, jotta sähköautojen lataamisvaikutukset saataisiin selville.

## 8. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin pienjänniteverkkoinfran kestävyyttä sähköautoilun lisääntyessä. Sähköautojen määrä tieliikenteessä on kasvavassa trendissä, joka tarkoittaa kasvua pienjänniteverkosta otetussa lataamistehossa. Pienjänniteverkko ei välttämättä kestä kasvanutta tehon kysyntää, jolloin verkkoinfraa joudutaan päivittämään tai kuluttajien lataamistottumuksia muokkaamaan.

Lataamistehon kasvun verkkovaikutusten taustaa käsiteltiin verkon käytettävyyden rajaeh-toja tarkastelemalla. Levinneisyysasteen ja lataamistehon verkkovaikutuksia tarkasteltiin eri tutkimusten suorittamien verkkosimulaatioiden avulla. Tehonkasvun verkkovaikutuksia tarkasteltiin myös lyhyesti verkkoyhtiön sekä verkkoyhtiön asiakkaan näkökulmista.

Useat verkkosimulaatiot ovat osoittaneet, että jo pienilläkin sähköautojen levinneisyysasteilla kontrolloimaton lataaminen voi aiheuttaa verkolle ongelmia. Tämän vuoksi lataamista tulisi hallita älykkäästi, jotta voitaisiin välttää ylimääräiset kalliit verkkoinfran päivitykset. Keskitetyllä älykkäällä lataamisella huomattiin olevan suuri vaikutus verkon käytettävyyden parantamisessa. Keskitetyssä lataamisessa jonkun tietyn alueen asiakkaiden kuormia valvot-taisiin ja rajoitettaisiin, jotta verkon tekninen käytettävyys säilyisi sekä asiakkaiden lataa-mistarve täyttyisi. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta huomattiin, että tällaisia matemaattisia latausalgoritmeja on kehitetty paljon, mutta todellista kohdetta, jossa tällainen olisi otettu käyt-töön ei löytynyt.

Eri verkkosimulaatioiden tulosten pohjalta voidaan todeta, että sähköautojen määrän kasvu tulee aiheuttamaan pienjänniteverkolle ongelmia, jos levinneisyysasteen kasvu toteutuu oletetun mukaisesti. Täytyy kuitenkin huomioida simuloitujen verkkojen mahdolliset erot suomalaisiin verkkoihin. Verkkovaikutuksia voisi pyrkiä hillitsemään vaikuttamalla asiakkaan lataamiskäyttäytymiseen. Huomion arvoista on kuitenkin se, että sähköautojen levinneisyysaste kasvaa hitaasti eikä sen lopullisesta asettumistasosta ole varmuutta. Verkkosaneeraus-toimille ja latausjärjestelmien kehittämiselle on siis aikaa.

Lataamistehon kasvun vaikutuksia tulisi aina tutkia tapauskohtaisesti, sillä pienjänniteverkot voivat erota toisistaan paljon. Tämän vuoksi simulaatiotuloksia ei voi yleisesti soveltaa kaik-

kiin verkkoihin. Sähköautojen lataamistehon kasvun ongelmien selvittämiseksi verkkoyhtiöiden tulisi simuloida mahdollisesti ongelmallisten verkonosien suoriutumista eri sähköautojen levinneisyysasteilla.

## LÄHTEET

de Hoog, J., Alpcan, T., Brazil, M., Thomas, D. A. and Mareels, I. "Optimal Charging of Electric Vehicles Taking Distribution Network Constraints Into Account," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 1, pp. 365-375, Jan. 2015.

ESE-Verkko Oy, Sähköliittymien hinnoittelumenetelmät, 12/2020. [Verkkodokumentti] [Viitattu 19.2.2021] Saatavissa

<https://ese.fi/files/ese-verkko%20oy%20-%20s%C3%A4hk%C3%B6liittymien%20hinnoittelumenetelm%C3%A4t.pdf>

Euroopan parlamentti, Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet, 08.03.2018. [Verkkodokumentti] [Viitattu 17.1.2021] Saatavissa

<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipäästöjä-vähentämässä-eu-n-tavoitteet-ja-toimet>

Gan, L., Topcu, U. and Low, S. H. "Optimal Decentralized Protocol for electric Vehicle Charging", in IEEE Transactions on Power Systems, vol 28, no. 2, May 2013.

Korenoff, G, "Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa". 2010. Espoo. Tutkimusraportti. VTT-R-07496-10.

Lassila, J., Kaipia, T., Haakana, J., and Partanen, J., Lappeenranta University of Technology, Järventausta, P., Rautiainen, A. and Marttila, M. 2010. Tampere University of Technology. Electric Cars – Challenge or Opportunity for the Electricity Distribution Infrastructure? *European Conference: Smart Grids and Mobility*. Würzburg, Germany.

Lakervi, E., Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Liikenne- ja viestintäministeriö. Liikenteen päästöt puoleen 2030 mennessä – tarvitaan laaja keinovalikoima. 27.10.2020. [Verkkodokumentti] [Viitattu 22.11.2020]. Saatavissa

<https://www.lvm.fi/-/liikenteen-paastot-puoleen-2030-mennessa-tarvitaan-laaja-keinovalikoima-1239139>

Liu, Z. and Wu, Q. "EV charging analysis based on the National Travel Surveys of the Nordic Area," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 2014, pp. 1-6.

Mahat, P., Handl, M., Kanstrup, K. R., Lozano, A. P. and Sleimovits, A. "Price based electric vehicle charging," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1-8.

Masoum, M. A. S., Moses, P. S. and Hajforoosh, S. "Distribution transformer stress in smart grid with coordinated charging of Plug-In Electric Vehicles," 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, 2012.

Motiva - Sähköautot. 24.8.2020. [Verkkodokumentti] [Viitattu 22.11.2020]. Saatavissa [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/va-litse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/va-litse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot)

Mu, Y., Wu, J., Jenkins, N., Jia, H., Wang, C. A Spatial–Temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles. *Appl Energy*, 114 (February) (2014), pp. 456-465

Qian, K., Zhou, C., Allan, M. and Yuan, Y. "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 802-810, May 2011.

Kiinteistöliitto, Korjausrakentamisbarometri, kevät 2020. [Verkkodokumentti] [Viitattu 15.2.2021]. Saatavissa <https://www.kiinteistoliitto.fi/palvelut/tutkimus/saannolliset/korjausrakentamisbarometri/>

Quirós-Tortós, J., Ochoa, L. F., Alnaser, S. W. and Butler, T. "Control of EV Charging Points for Thermal and Voltage Management of LV Networks," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3028-3039, July 2016.



Rautiainen A., Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids, Tampere University of Technology, Vol. 1327, 2015.

Richardson P., Flynn, D. and Keane, A. "Optimal Charging of Electric Vehicles in Low-Voltage Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 1, pp. 268-279, Feb. 2012.

Richardson, P., Flynn, D. and Keane, A. "Local Versus Centralized Charging Strategies for Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Systems," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 1020-1028, June 2012.

SESKO - Sähköautojen lataussuositus. 27.5.2019. [Verkkodokumentti] [Viitattu 22.11.2020]. Saatavissa

[https://www.sesko.fi/files/1098/Lataussuositus\\_2019\\_2019-05-27.pdf](https://www.sesko.fi/files/1098/Lataussuositus_2019_2019-05-27.pdf)

Simonen, M. 2006. Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kotka.

Sharma, I., Cañizares, C. and Bhattacharya, K. "Smart Charging of PEVs Penetrating Into Residential Distribution Systems," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 3, pp. 1196-1209, May 2014.

Tieto & Trendit, Sami Lahtinen, 2018 – Henkilöautoilla ajettiin edellisvuosien lailla – maanteiden tavarankuljetukset tehostuivat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.12.2020]. Saatavissa <https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2018/henkilöautoilla-ajettiin-edellisvuosien-lailla-maanteiden-tavarankuljetukset-tehostuivat/>

Tikka, V. 2010. Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta.

Työ- ja elinkeinoministeriö, Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.12.2020]. Saatavissa <https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/3506436/Valtioneuvoston+selonteko+kansallisesta+energia-+ja+ilmastostrategiasta+vuoteen+2030.pdf>

Verkostosuositus 2003 SA 2:08 Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen, Energiateollisuus ry.

Verzijlbergh, R. A., Lukszo, Z., Slootweg, J. G. and Ilic, M. D. "The impact of controlled electric vehicle charging on residential low voltage networks," 2011 International Conference on Networking, Sensing and Control, Delft, 2011.

Vainiala, O. 2019. Sähköverkon siirtotuotteiden tariffien tehopohjainen rakenne ja vaikutukset. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo.

Virta, Miksi sähköauton lataus tarvitsee älyä, 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.1.2021]. Saatavissa

<https://www.virta.global/fi/blogi/miksi-s%C3%A4hk%C3%B6auton-lataus-tarvitsee-%C3%A4ly%C3%A4>

Zhang, P., Qian, K., Zhou, C., Stewart, B. G. and Hepburn, D. M. "A Methodology for Optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging Load," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1628-1636, Aug. 2012.