



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
LUT ENERGIA
SÄHKÖTEKNIikka

DIPLOMITYÖ

SÄHKÖAUTOJEN PIKALATAUKSEN VERKKOVAIKUTUKSET

Tarkastajat Professori Jarmo Partanen

 TkT Jukka Lassila

Tekijä Ville Tikka

Tiivistelmä

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikka

Ville Tikka

Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset

Diplomityö

2010

105 sivua, 47 kuvaa, 17 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Jarmo Partanen ja TkT Jukka Lassila

Avainsanat: Sähkönjakeluverkot, sähköauto, keskijännite, pienjännite, pikalataus, lataus

Euroopan unionin energiapolitiikka on luonut paineen parantaa energiatehokkuutta kaikilla energiankäytön aloilla. Merkittävä osa energiasta kulutetaan liikenteessä, joten sähköautojen käyttöönotolla voidaan parantaa energiatehokkuutta merkittävästi. Tämän vuoksi on tarkasteltava sähköautojen laajamittaisen levinneisyyden aiheuttamia vaikutuksia sähköverkolle.

Tässä diplomityössä tarkastellaan sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutuksia. Tarkastelu painottuu kotilatauksen tarkasteluun taajamissa ja maaseudulla. Kuormituksen kasvu simuloidaan hyödyntäen sähköauton lataukselle laskettua kuormituskäyrää, jonka laskenta perustuu keskimääräiseen henkilöauton liikkuamiseen, joka on saatavilla Suomen henkilöliikennetutkimuksesta.

Simuloinnin tulosten perusteella sähköauton pikalatauksen verkkovaikutukset ovat merkittäviä keskijänniteverkossa ja pienjänniteverkossa. Suuremmat vaikutukset kohdistuvat pienjänniteverkkoon.

Abstract

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Electrical Engineering

Ville Tikka

Network Effects of Fast Charging Electric Vehicles

Master's thesis

2010

105 pages, 47 pictures, 17 tables and 4 appendixes

Examiners: Professor Jarmo Partanen and D.Sc. Jukka Lassila

Keywords: Distribution networks, electric vehicle, medium voltage, low voltage, fast charging, charging

The EU's energy policy has created a need to improve energy efficiency in all areas of energy consumption. Electric vehicles are one solution to improve energy efficiency in area of the civil transportation. It is essential to study effect to the grid caused by large number of electrical vehicles connected.

The aim of this diploma thesis is to study low and medium voltage network effect of fast charging electrical vehicles connected directly to low voltage networks in city and rural areas. In order to define scale of the network effects, simulation were made based on load curves of an average domestic electric vehicle charging spot. The average energy consumption and load curve of the electric vehicle is calculated by average mileage and driving habits of Finnish combustion engine car user which are examined in the Finnish national transportation survey.

Simulation shows large network effects in low voltage networks and some effect in medium voltage network with high penetration level of electric vehicles.

Alkusanat

Tämä diplomityön tilaajana toimi Lappeenrannan teknillisen yliopiston LUT Energian Sähkömarkkinalaboratorio. Työ tehtiin osana laajempaa tutkimushanketta, joka käsittelee älykästä verkkoa. Osaksi ympäristöpolitiikan, ympäristötietoisuuden lisääntymisen ja teknisen kehityksen vuoksi sähköautojen yleistymisen on alkanut tulla ajankohtaiseksi. Tästä syystä on järkevää tarkastella sähköautojen vaikutusta sähköverkon kannalta. Tarkastelu valmistaa myös sähköverkkoyhtiöitä tuleviin haasteisiin.

Haluan kiittää työn ensimmäistä tarkastajaa professoria Jarmo Partasta mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö, sekä kommentteista työhön liittyen. Erityisen kiitoksen haluan osoittaa työn toiselle tarkastajalle ja ohjaajalla TkT Jukka Lassilalle erinomaisesta ohjauksesta. Työn kirjoittaminen ja aiheeseen tutustuminen oli varsin antoisaa ja mielenkiintoista.

Lisäksi haluan kiittää avopuolisoani Annia ja perhettäni tuesta ja opiskelun mahdollistamisesta.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
Abstract	2
Alkusanat	3
Sisällysluettelo	4
1 Johdanto	7
2 Sähköautot	11
2.1 Taustaa.....	11
2.2 Electric Vehicle, EV	12
2.3 Hybrid Electric Vehicle, HEV	15
2.4 Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV	16
2.5 Autojen energiankulutus.....	16
2.6 Tulevaisuuden näkymät.....	17
3 Akkuteknologia	19
3.1 Lyjyjakku.....	19
3.2 Nikkeliakku	20
3.3 Litiumakku	21
3.4 Sovellettavuus pikalataukseen	22
3.5 Tulevaisuuden näkymät.....	25
3.6 Turvallisuus	25
4 Auton käyttö	26
4.1 Keskimääräiset ajomatkat.....	28
4.2 Ajojen jakautuminen maantieteellisesti	31
5 Lataustekniikka	32
5.1 Lataustyyppien luokittelu	35
5.1.1 Hidas lataus (Level 1)	35
5.1.2 Nopea lataus (Level 2)	35
5.1.3 Pikalataus (Level 3).....	36
5.2 Sovellettavuus pienjänniteverkossa	36

5.2.1	Omakotitalot.....	37
5.2.2	Rivitalot ja kerrostalot.....	38
5.2.3	Joukkoliikenteen liityntäpysäköinti ja markettien parkkipaikat.....	38
5.3	Sovellettavuus keskijänniteverkossa.....	39
6	Simuloitava verkko ja simulointimenetelmät.....	41
6.1	Simuloitavan verkon kalibrointi.....	41
6.2	Simulointi.....	42
6.2.1	Simuloinnin parametrit.....	43
6.2.2	Kuormituksen kasvun simulointimenetelmät.....	46
6.3	Johdinten teknistaloudellinen tarkastelu.....	48
6.3.1	Johdinvaihdon taloudellisen rajatehon laskenta.....	48
6.3.2	Uuden johdon mitoitus.....	50
7	Sähköautojen latauskuorman verkkovaikutusten simulointi.....	53
7.1	Keskijänniteverkkoverkko.....	53
7.1.1	Nykytilanne.....	53
7.1.2	Verkon saneeraustarve nykytilanteessa.....	56
7.1.3	Kuormituksen kasvun simulointi vakiokerroinmenetelmällä.....	59
7.1.4	Kuormituksen kasvun simulointi kuormitusmalleja muokkaamalla.....	63
7.1.5	Latauksen keskijänniteverkkovaikutusten yhteenveto.....	75
7.2	Pienjänniteverkko.....	76
7.2.1	Taajamamuuntopiirin tarkastelu.....	77
7.2.2	Haja-asutusalueen muuntopiiri.....	81
7.2.3	AMR -mittauksiin perustuva simulointi.....	86
7.2.4	Pienjänniteverkon verkkovaikutusten yhteenveto.....	93
8	Johtopäätökset.....	94
9	Yhteenveto.....	96
	Lähdeluettelo.....	98
	LIITTEET	

Lyhenteet ja symbolit

AMR	Automatic Meter Reading
CO ₂ - ekv	hiilidioksidi ekvivalentti
DC	Direct Current
EU	Euroopan unioni
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
pns	pienin neliösumma
SOC	State of Charge, latausaste
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VTJ	verkkotietojärjestelmä
$\cos \varphi$	tehokerroin
ε	annuiteettikerroin
H_p	häviöiden hinta
I	virta
K_{h1}	nykyisen johdon seuraavan vuoden häviökustannukset
K_{h1}	johtimen 1 käyttöiän aikainen häviökustannus
K_{h2}	suuremman johtimen seuraavan vuoden häviökustannukset
K_{h2}	johtimen 2 käyttöiän aikainen häviökustannus
K_v	johtimien rakennuskustannuksien erotus
K_{vah}	johdinvaihdon kustannukset
n	tarkastelu vuosien määrä
P	pätöteho
P_0	johdon teho alkuhetkellä
$P_{lisäys}$	verkkoon lisättävän tehon kokonaissumma
P_{max}	lähdön huipputeho
P_N	nimellisteho
R_j	johdon resistanssi
S	näennäisteho
U	pääjännite
t	aika

1 Johdanto

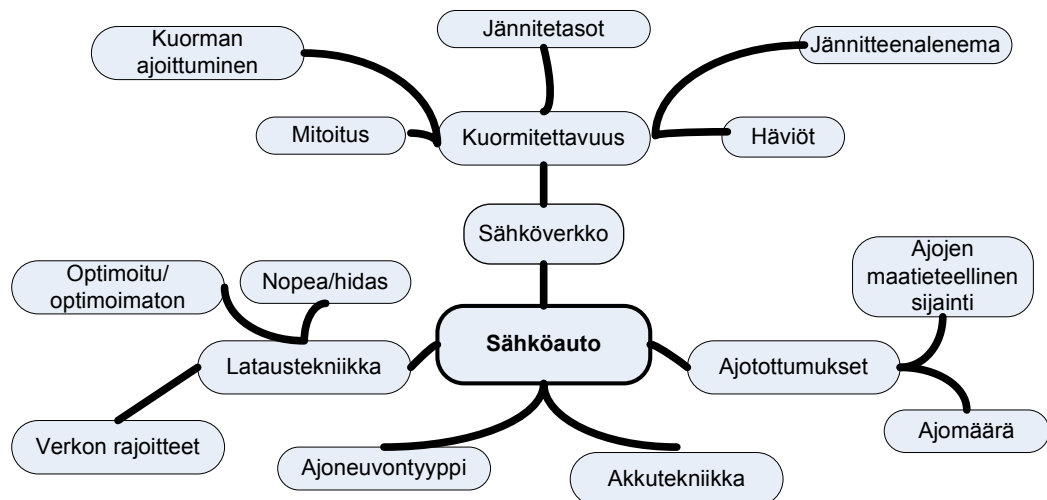
Ympäristöpoliittinen ilmapiiri on muuttunut merkittävästi viime vuosikymmenten aikana ja etenkin viimeisten vuosien aikana. Ilmapiirin muutokseen on vaikuttanut mediassa paljon käsitelty ilmastonmuutos ja kasvihuonekaasujen vaikutus muutoksen nopeuteen. Euroopan unioni on asettanut tavoitteen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä samalla, kun uusiutuvien energialähteiden käyttöä lisätään ja energiatehokkuutta parannetaan 20 % vuoteen 2020 mennessä (EU 2010). Sähköautojen kehitys on osa energiatehokkuuden parantamista ja kokonaispäästöjen vähentämistä, koska liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ovat kokonaispäästöihin verrattuna melko suuret, 13,4 milj. t CO₂- ekv, muiden päästöjen ollessa 58,1 milj. t CO₂- ekv, vuonna 2008 Suomessa. (Tilastokeskus 2010)

Nykyiset polttomoottoriautot toimivat melko huonolla hyötysuhteella, joten sähköautoilla ja hybriditekniikalla voi olla suurikin kehityspotentiaali energiatehokkuuden parantamisessa. Sähköautojen kehitykseen vaikuttaa mm. akkuteknologia ja akkujen latauksen toteuttaminen. Akkuteknologian tasoa voidaan jo pitää riittävänä sähköautojen yleistymisen kannalta, mutta akkujen latausinfrastruktuurissa on vielä paljon kehitettävää. Pohjoismainen sähköverkkojen rakenne sopii hyvin latauspisteiden sijoittamiseen esimerkiksi kotitalouksiin, koska pohjoismaissa lähes jokaiseen kotitalouteen on kytketty kolmivaihesähköliittymä ja useassa tapauksessa myös lämmitystolppa auton talvilämmitystä varten. Lisäksi etuna on pohjoisen kylmä talvi, joka on asettanut verkon mitoitukselle suuremmat vaatimukset sähkölämmitteisten talojen vuoksi.

Autojen latauksen toteuttamiseen on monia vaihtoehtoja. Lataus voidaan toteuttaa hitaalla latauksella yhdistettynä älykkääseen kuormanohjaukseen tai pikalatauksella suurilla tehoilla.

Autojen määrän kasvaessa ja pikalataustarpeen lisääntyessä voi ilmetä tarvetta parantaa verkkoa tai etsiä vaihtoehtoisia ratkaisuja akkujen lataamisen toteuttamiseksi. Autokannan sähköistyminen tarkoittaa myös sähkönkulutuksen kasvua merkittävässä määrin eli sähköntuotantokapasiteettia on todennäköisesti lisättävä sähköautokannan lisääntyessä, ellei sähkön kulusta voida vähentää muilla keinoilla riittävästi. Aiheen piirissä on tehty tutkimusta useissa tutkimuslaitoksissa. Tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että sähköautojen lataus voi aiheuttaa sähköverkolle haasteita (Soares 2010; Getf et al. 2010).

Kuvassa 1.1 on kuvattu työhön liittyviä asioita ja asioiden keskinäisiä riippuvuuksia. Esitetty kuva antaa hyvän kokonaiskuvan aiheen monisäikeisyydestä ja laajuudesta. Kuvassa ei ole piirretty selkeyden vuoksi kaikkien asioiden välille assosiaatioviivaa, vaikka asiat voisivatkin sitä edellyttää vaan ainoastaan tärkeimmät kohdat on huomioitu.



Kuva 1.1 Sähköautoon ja auton lataukseen liittyviä asioita.

Tässä diplomityössä perehdytään sähköautojen, hybridautojen ja ladattavien hybridautojen ominaisuuksiin sekä akkuteknologian asettamiin rajoituksiin. Nykytilanteen ohella pyritään valottamaan alan tulevaisuuden näkymiä niin autojen, kuin akkuteknologian kannalta. Työn pääpaino on sähköautojen lataustekniikan verkkovaikutusten pohtimisessa ja erilaisten tilanneskenaarioiden mallintamis-

sa, käsitellen pääasiassa nopeita lataustapoja. Seuraavat kappaleet kuvaavat työn rakennetta tarkemmin.

Toisessa luvussa käsitellään sähköautojen perusteita ja erilaisia sähköautotyyppejä. Tarkoitus on valottaa myös sähköauton pitkää historiaa ja kilpailukykyä polttomoottoriautoihin verrattuna.

Kolmannessa luvussa tarkastellaan akkutekniikan kehitystä ja hieman historiaa. Akkujen tehotiheys ja energiatiheys ovat oleellisessa osassa sähköautoista puhuttaessa, koska tehotiheys vaikuttaa auton suorituskykyyn esimerkiksi kiihtyvyyden muodossa ja energiatiheys vaikuttaa mahdollisen akkukapasiteetin määrään ja näin ollen auton käyttösteeseen.

Neljännessä kappaleessa perehdytään henkilöauton käyttöön Suomessa. Keskimääräisen ajomatkan määrittäminen luo pohjan päivittäiselle latausenergian määrälle ja verkkotarkastelulle. Luvussa pyritään myös esittämään arvioita alueellisista autonkäyttömääristä ja näin ollen latausenergian tarpeesta.

Viides luku käsittelee olemassa olevaa lataustekniikkaa ja pyrkii antamaan lukijalle kuvan latausnopeuksien luokittelusta ja erilaisten sovellusten käyttökohteista. Luvussa pohditaan myös sähköauton latauksen mahdollisuutta erilaisissa ympäristöissä kuten markettien parkkipaikoilla tai julkisen liikenteen liityntäpysäköintialueilla.

Kuudes luku keskittyy sähköautojen latauksen verkkovaikutusten tarkasteluun esimerkkiverkossa. Luvussa tarkastellaan simuloitavaa verkkoa yleisesti ja luodaan edellytykset latauskuorman simuloinnille. Luku käsittelee lyhyesti myös teknistaloudellisen laskennan perusteita tulosten analysoinnin tueksi.

Seitsemäs luku käsittelee erikseen pienjänniteverkon ja keskijänniteverkon kuormituksen kasvun verkkovaikutukset. Simuloinnin tuloksena pyritään selvittämään kuormituksen luonne ja vaikutukset verkolle. Esimerkitapauksien yh-

teydessä tehdään kuormituksen kasvun seurauksena aiheutuvan verkon vahvistamistarpeen kustannusarviot yleisellä tasolla puuttumatta tarkasteltavan verkon ominaisuuksiin tarkemmin.

Kahdeksas ja yhdeksäs luku ovat johtopäätökset ja yhteenveto. Johtopäätökset -luvussa esitetään simuloinnin tuloksena saadut päätelmät latauksen verkkovaikutuksista ja ehdotuksista. Yhteenveto luvussa kerätään työn aikana tehdyt ja ilmenneet asiat yhteen selkeäksi kokonaisuudeksi.

2 Sähköautot

Sähköautolla tarkoitetaan yleensä autoa, joka kulkee akkuihin varastoidun sähköenergian voimalla (Ehsani et al. 2010). Sähköautoja on totuttu näkemään yleensä esimerkiksi postitoimistojen jakeluautoina ja pienissä määrin kaupunkien keskustoissa pieninä kaupunkisähköautoina. Ihmisten ympäristötietoisuuden ja -valistumisen lisääntymisen seurauksena ympäristöpolitiikka on muuttunut vähäpäästöisiä autoja suosivammaksi. Näin ollen kiinnostus sähköautoja kohtaan on lisääntynyt ja tutkimuspanokset suurten autonvalmistajien taholta ovat lisääntyneet merkittävästi.

Sähköautolla voidaan tarkoittaa myös osittain sähköllä kulkevaa autoa eli hybridi-autoa. Hybridiautossa on sähkömoottorin ja akkujen lisäksi polttomoottori, joka voidaan käynnistää, kun sähkömoottorin teho ei riitä tai akkujen varaus on vähissä. Ladattavaa hybridi-autoa voidaan käyttää myös pelkällä sähköenergialla vastaavasti kuin pelkällä sähköllä toimivaa sähköautoa. Ladattavan hybridiauton etuna on helposti laajennettava käyttösäde, koska akun varauksen vähentyessä voidaan ottaa käyttöön polttomoottori, jolla matkaa voidaan jatkaa polttoaineen turvin.

Seuraavissa kappeleissa käsitellään tarkemmin erityyppisiä sähköautoja ja niiden ominaisuuksia. Myös sähköauton energiatehokkuutta tarkastellaan koko sähköntuotantoketjun kannalta verraten vastaavaan energiaketjuun polttomoottoriauton tiulanteessa. Lopuksi tarkastellaan sähköautojen tulevaisuuden näkymiä ja sähköautoihin kohdistuvia odotuksia.

2.1 Taustaa

Sähköautojen ajatellaan usein olevan uutta teknologiaa, mutta todellisuudessa ensimmäinen sähköauto rakennettiin jo vuonna 1881 ranskalaisen Gustave Trouvén toimesta. Auto oli kolmipyöräinen ja sen voimanlähteenä toimi pieni DC -moottori, jonka energialähteenä toimivat lyijyakut. (Ehsani et al. 2010)

Sähköautot kilpailivat alkuaikoinaan pääasiassa hevosvaunujen kanssa joten autojen suorituskyvyltä ei vaadittu niin paljoa kuin myöhemmin polttomoottorien kehityksen myötä. Hieman myöhemmin polttomoottoriautojen yleistyttyä autojen suorituskyky parani ja sähköauto ei enää ollut kilpailukykyinen polttomoottoriautoon verrattuna.

Sähköisenliikkumisen suosio alkoi lisääntyä 60 -luvun jälkeen ympäristötietoisuuden lisääntyessä. Ongelmana oli kuitenkin sähköautojen rajallinen suorituskyky akkuteknologian vuoksi. Sähköautolla ei voitu saavuttaa polttomoottoriautolle tyypillistä suorituskykyä ja pitkää toimintamatkaa. Nestemäisten polttoainneiden energiatiheys on akkujen energiatiheuteen verrattuna hyvin pieni.

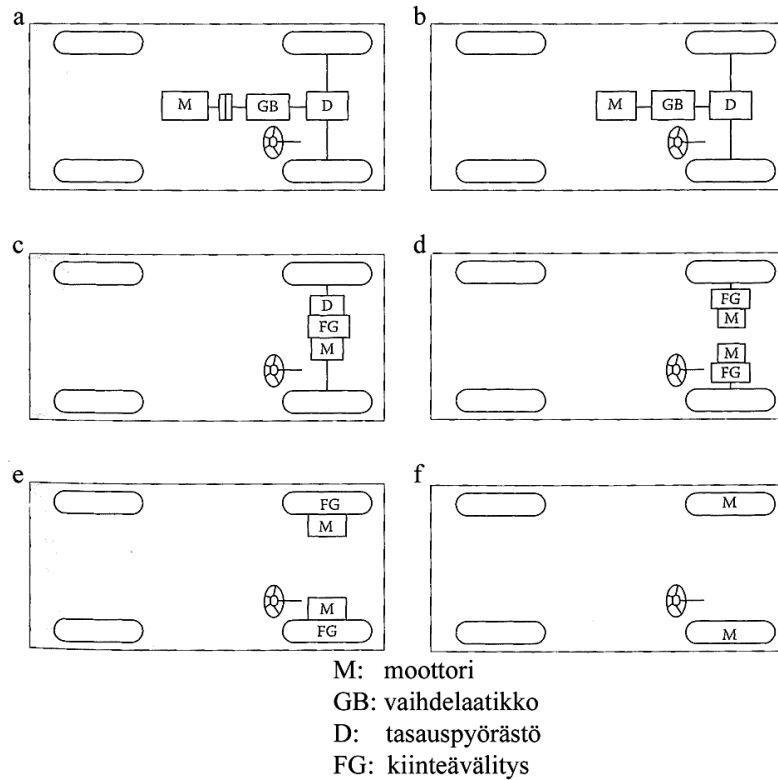
Nykyisten sähköautojen läpimurron alkuna voidaan pitää Toyota Prius hybridauton markkinoille tuontia Japanissa 1997. Myöhemmin 2000 -luvulla kyseistä autoa oli saavavilla myös Japanin ulkopuolisilla markkinoilla. (Toyota 2010) Hybridautoja valmistaa tällä hetkellä esimerkiksi myös Lexus (Lexus 2010). Hybridautomarkkinoilla on myös uusia tulokkaita kuten Chevrolet, joka on aloittamassa oman hybridauton tuotannon vuoden 2010 aikana (Chevrolet 2010). Myös puhtaasti sähköllä kulkevia autoja on saatavilla monia. Esimerkkinä voidaan mainita Think, joka on ilmoittanut aloittavansa autojen myynnin Suomessa (Think 2010). Myös tunnetumpi autonvalmistaja Nissan on tuomassa sähköautoa markkinoille Pohjois-Amerikassa lähiaikoina (Nissan 2010).

2.2 Electric Vehicle, EV

Sähköauto on puhtaasti sähköenergian avulla liikkuva auto, jossa sähköenergia voi olla varastoitu akkuihin. Sähköauto voi olla myös johdinauto, jossa sähköä ei varastoida autoon vaan se johdetaan auton ajoreitin yläpuolelle asennetuista johdista autoon. Tässä diplomityössä käsitellään ainoastaan sähköautoja, joissa sähköenergia varastoidaan autoon akkujen avulla. Sähköauton liikkumiseen tarvittava sähköenergia voidaan varastoida monen tyyppisiin energialähteisiin kuten kemiallisiin akkuihin, superkondensaattoreihin, polttokennoihin tai vauhtipyö-

riin. Energiavarastojen käyttötarkoitus on riippuvainen varaston tyypistä. Kemiallisiin akkuihin voidaan varastoida varausta pitkiksi ajoiksi, kun taas esimerkiksi vauhtipyörällä voidaan varastoida vain rajallinen varaus energiaa vain rajallisen ajan. Vauhtipyörä voikin olla oivallinen energiavarasto esimerkiksi jarrutusenergian keräämiseen.

Sähköauton voimansiirto voidaan toteuttaa hyvin monella tavalla, kuten kuvassa 2.1 on havainnollistettu. Sähköauto voidaan esimerkiksi toteuttaa korvaamalla perinteisen polttomoottoriauton moottori sähkömoottorilla säilyttäen alkuperäinen autossa oleva mekaniikka. Toteutusta voidaan myös yksinkertaistaa ja poistaa autosta tarpeettomat osat kuten kytkin ja vaihdelaatikko, jolloin jäljelle jää vain sopiva alennusvaihte ja tasauspyörästö. Yksinkertaisimmillaan sähköauton sähkömoottorit voidaan sijoittaa renkaiden sisälle jolloin mekaanista energiaa ei tarvitse siirtää lainkaan erillisellä mekaanisella voimansiirrolla.

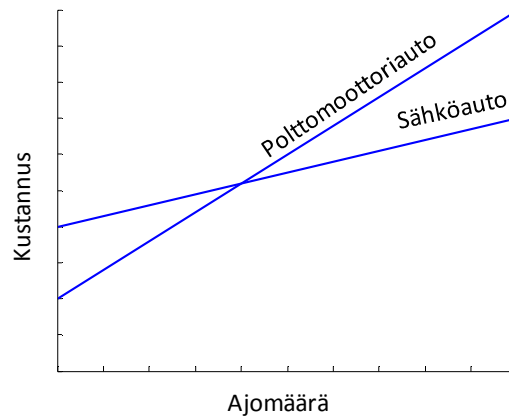


Kuva 2.1 Erilaisia sähköautoratkaisuja, a) perinteisen polttomoottoriauton moottori korvattu sähkömoottorilla, b) perinteisestä mallillista on poistettu kytkin, c) moottori sijoitettu poikittain akselille ja vaihdelaatikko on korvattu kiinteällä välityksellä, d) molemmille pyörille on kytketty moottorit kiinteillä välityksillä, e) kiinteällä välityksellä oleva vaihteisto toteutettu planetaarisilla vaihteistoilla, f) kohdassa moottorit sijoitettu vetävien pyörien sisään (Ehsani et al. 2010).

Sähköauton suurin etu on rakenteen yksinkertaisuus ja näin ollen erittäin vähäinen huollon tarve. Sähköauto voidaan rakentaa mekaanisesti erittäin yksinkertaisesti, koska monimutkaista voimansiirtotekniikkaa ei tarvita. Koska sähkömoottoreilla voidaan saavuttaa erittäin suuri vääntömomentti aina käynnistyksestä alkaen, autossa ei tarvita lainkaan vaihdelaatikkoa (Ehsani et al. 2010). Sähköauton etuna on myös hiljaisuus, joka voi olla hyvinkin merkittävä tekijä esimerkiksi kaupunkien keskustoissa. Toisaalta kääntöpuolena on jalankulkijoiden turvallisuus, koska auto voi lähestyä huomaamatta ja aiheuttaa näin vaaratilanteen.

Sähköauto tulee tulevaisuudessa kilpailemaan myös taloudellisuudella. Polttoaineen hinnan noustessa sähköauton kilpailukyky kasvaa edullisemmän sähköenergian vuoksi, vaikka sähköauton alkuinvestointi olisi merkittävästi suurempi

kuin polttomoottoriautolla. Kuvassa 2.2 on esitetty periaatekuva sähköauton ja polttomoottoriauton kustannuksia käyttömäärän funktiona. Käyttömäärän lisääntyessä autojen kustannukset leikkaavat ja sähköauto osoittautuu edullisemmaksi kokonaiskustannuksia ajatellen.



Kuva 2.2 Sähkö- ja polttomoottoriauton kokonaiskustannukset ajomäärän funktiona.

2.3 Hybrid Electric Vehicle, HEV

Hybridiautoksi kutsutaan autoa, jossa on kaksi erityyppistä voimanlähdettä kuten polttomoottori ja sähkömoottori. Yhdistämällä kaksi erilaista voimalähdettä voidaan hyödyntää molemmille voimalähteille ominaisia hyviä ominaisuuksia ja näin saavuttaa tehokas kokonaisuus. Toisaalta on huomioitava, että hyvien ominaisuuksien lisäksi mukaan tulee molempien tekniikoiden huonoja puolia. (Ehsani et al. 2010)

Hybridiajoneuvot voidaan jakaa neljään erityyppiseen ryhmään vetotavan ja voimavälityksen perusteella. Sarjahybridissä moottorit on kytketty sarjaan eli vain toinen moottori on suorassa yhteydessä ajoneuvon vetäviin renkasiin. Rinnakkaishybridissä molemmat moottorit on yhdistetty mekaanisesti ajoneuvon pyöriin. Lisäksi hybridiajoneuvot voidaan jakaa sarja-rinnakkais-hybrideihin ja seka-hybrideihin, jotka ovat kahden edellä mainitun tyyppin yhdistelmiä. (Ehsani et al. 2010)

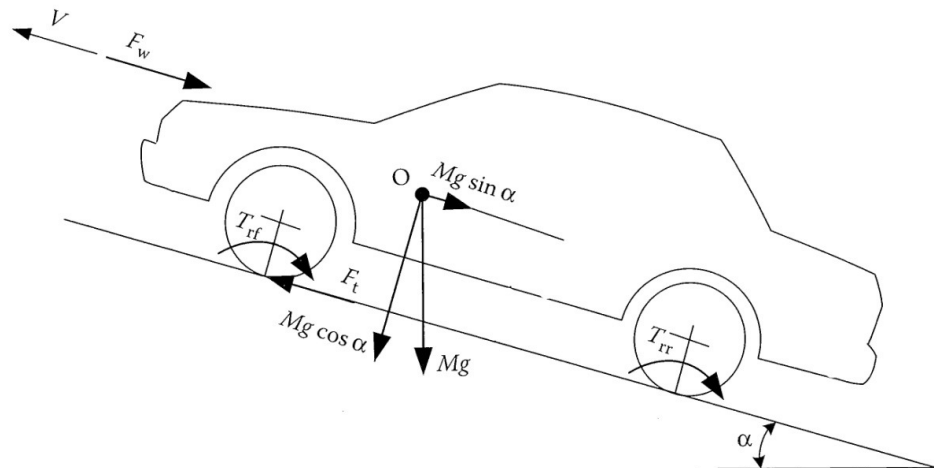
2.4 Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV

PHEV auto on periaatteessa hybridauto, mutta autoa voidaan ladata ja näin ollen lyhyillä matkoilla ei tarvitse käyttää lainkaan polttomoottoria. Akkukapasiteettia lisäämällä voidaan kasvattaa auton käyttöäädettä kuitenkin auton painon ja hankintahinnan kustannuksella. Auton kilpailukykyä puhtaaseen sähköautoon on vaikea verrata, koska auton tekniikka ja ominaisuudet poikkeavat toisistaan niin paljon. Ladattavaa hybridiä voidaan pitää puhtaana sähköautona siinä mielessä, että sillä voidaan suorittaa pieniä matkoja ilman polttomoottorin apua. Akkujen kapasiteetin loputtua polttomoottori varmistaa, että matkanteko ei pääty. Sähköautolla ei ole tällaista optiota käytössä. Ladattava hybridi on kuitenkin teknisesti huomattavasti monimutkaisempi ja näin ollen kalliimpi ja enemmän ylläpitotoimia vaativa.

2.5 Autojen energiankulutus

Auton energiankulutus koostuu pääasiassa renkaiden vierintävastuksesta ja ilmanvastuksesta. Mäkisessä maastossa mukana on myös potentiaalienergian muutosten vaatima energiankulutus sekä ajonopeuden muutoksista johtuva kinettisen energian muutoksen tarvitsema energia. (Ehsani et al. 2010)

Autolle voidaan piirtää voimavektorikuvaaja kuvan 2.3 mukaisesti. Kuvassa auto on nousemassa mäkeä vakionopeudella. Autoon vaikuttaa näin ollen perusmekaniikan mukaan painovoima, joka voidaan jakaa komponentteihin auton kulkuuntavektorin ja sen kohtisuoran kesken. Lisäksi auton liikettä vastustaa renkaista aiheutuva vierintävastus ja auton korista aiheutuva ilmanvastus.



Kuva 2.3 Voimavektorikuva autosta joka liikkuu vakionopeudella ylämäkeen. (Ehsani et al. 2010)

Autossa kuluu energiaa myös voimansiirtoon moottorin ja renkaiden välillä. Myös perinteisen polttomoottorin käytössä syntyy paljon häviötä ja näin ollen auton kokonaishyötysuhde polttoaineesta auton renkaiisiin on melko pieni. Sähköauton tapauksessa hyötysuhde parantuu merkittäväksi, jos sähkö mielletään polttoaineeksi. Sähkömoottorit toimivat yleensä hyvällä hyötysuhteella ja lisäksi yksinkertaisempi voimansiirto säästää energiaa. Näin ollen sähköauton hyötysuhde on polttomoottoriautoa parempi. Kun tunnetaan kaikki auton mekaniikkaan vaikuttavat tekijät, voidaan määrittää auton liikuttamiseen tarvittava energiamäärä.

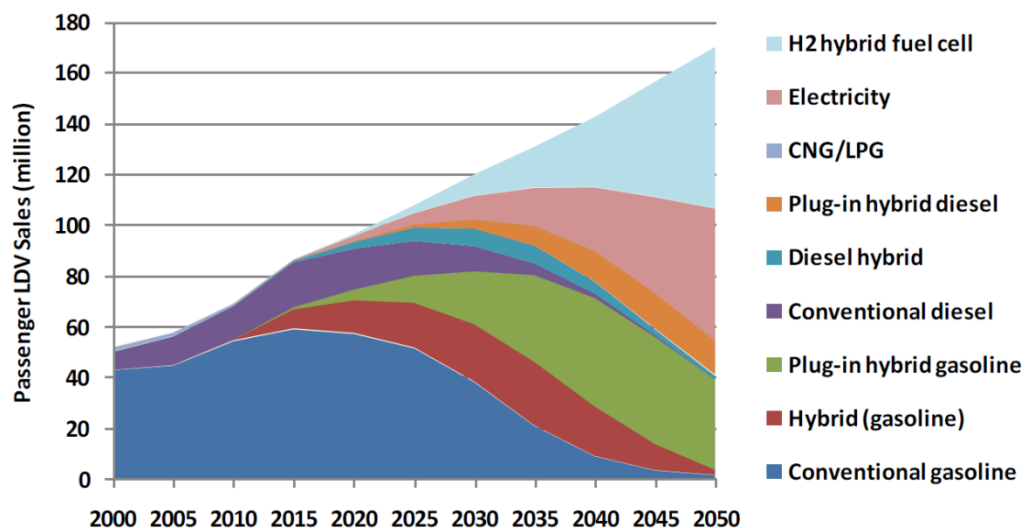
Jos oletetaan, että sähkö tuotetaan tuulivoimalla tai vesivoimalla on tuotannon, sähkönsiirron ja -jakelun energiatehokkuus yli 90 % luokkaa. Sähköauton hyötysuhde on myös noin 90 % luokkaa joten yhdistelmän energiatehokkuus on yli 80 %. Perinteisen polttomoottoriauton tapauksessa energiatehokkuus jää noin 20–30 % välille pääasiassa polttomoottorien huonon hyötysuhteen vuoksi.

2.6 Tulevaisuuden näkymät

Sähköautojen tulevaisuuden ennustaminen on hyvin vaikea. Varmasti voitaneen sanoa ainoastaan, että sähköautot tulevat yleistymään jossain muodossa. Yleistymisen nopeuden arvioiminen voi olla haasteellinen tehtävä, koska asiaan vai-

kuttaa niin moni tekijä. Suuret autonvalmistajat ovat ilmoittaneet tuovansa puhtaasti sähköautoja ja ladattavia hybridautoja markkinoille lähivuosien aikana. (Chevrolet 2010; Nissan 2010) Autojen hinnoittelussa on kuitenkin suuria eroja tuotannon toistaiseksi pienien volyymien ja akkutekniikan kehityksen vuoksi. Autojen myynnin ja energian verotus on myös yksi asiaan suuresti vaikuttava tekijä öljyn hinnan kehityksen ohella.

Kuvassa 2.4 on esitetty eräs arvio uusien autojen myynnin kehityksestä. Arvion mukaan tavanomaisten uusien bensiinimoottoriautojen myynti olisi vuoteen lähes loppunut vuoteen 2050 mennessä. Samalla hybridautojen, sähköautojen ja polttokennoautojen myynti olisi lisääntynyt merkittävästi kokonaisymyynnin samalla lisääntyessä.

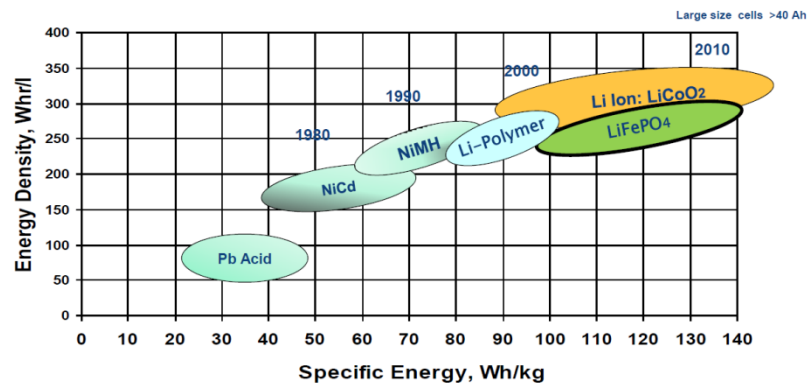


Kuva 2.4 Eräs arvio uusien autojen myyntiosuuksien kehityksestä. (Fulton 2009)

Autojen myyntimäärien kehitys on riippuvainen kuluttajien halukkuudesta ostaa sähköauto tai hybridauto. Toisaalta kehitykseen vaikuttaa myös autonvalmistajien valmius tuottaa hybridi- ja sähköautoja. Sähköautojen myyntimäärien kehityksestä on esitetty monia arvioita eri tahojen toimesta. Arvioita on kuitenkin syytä tarkastella kriittisesti, koska arvioiden pohjalla ei ole tilastoja tai vertailukohtaa historiassa.

3 Akkuteknologia

Akkuteknologian kehitys on ollut viimeaikoina nopeaa ja uusia akkuteknologioita on tullut nopeasti markkinoille. Uusimpana tulokkaana ovat erilaiset litium-akut jotka kilpailevat etenkin keveydellä ja hyvällä syklikestolla. Kuvassa 3.1 kuvataan akkuteknologian kehitystä viimeisten vuosikymmenien aikana. Tällä hetkellä litiumion -tekniikka on varteenotettavin vaihtoehto, koska sillä voidaan saavuttaa suurin teho- ja energiatiheys. Kehityksen kärjessä on kaksi toisistaan melko paljon poikkeavaa litium -tekniikka litium-rauta-oksidi, joka on paremmin tunnettu myös nimellä LFP (LiFePO₄, Lithium Iron Phosphate) sekä litium-koboltti-oksidi.



Kuva 3.1 Akkutekniikan kehitys vuosien saatossa. Vaaka-akselilla on esitetty tehon suhde painoon ja pystyakselilla energiatiheys painon suhteen. (Alatalo 2010)

Seuraavissa kappaleissa käsitellään lyhyesti joitakin akkutyyppejä ja niiden toimintaperiaatteita. Lopuksi pohditaan nykyisten akkujen sopivuutta pikalataukseen ja yritetään valottaa akkuteknologian tulevaisuuden näkymiä.

3.1 Lyijyakku

Lyijyakku on tunnettu ja pitkään käytössä ollut akkutyyppejä. Yleisimpänä käyttökohteena voidaan pitää polttomoottoriautoja joissa akkua käytetään polttomoottorin käynnistämiseen ja oheislaitteiden tehollähteenä. Akussa voi olla nestemäinen tai geelimäinen elektrolyyttiaine käyttökohteesta riippuen. (Larmine & Lowry 2003)

Akku koostuu kahdesta elektrodista jotka ovat elektrolyytinesteessä. Lyijyakun tapauksessa elektrolyytinä toimii rikkihappo. Akun latauksen ja purkamisen yhteydessä tapahtuu kemiallinen reaktio katodin ja anodin välillä elektrolyytinesteessä. Akun latauksen sivutuotteena voi muodostua hieman vetyä. (Nelson & Bolin 1995) Taulukossa 3.1 on esitetty muutamia tyypillisen lyijyakun suoritusarvoja.

Taulukko 3.1 Tavanomaisen lyijyakun tyypillisiä suoritusarvoja. SOC (State of Charge) kuvaa akun lataustasoa. (Larmin & Lowry 2003)

Energiatiheys		Wh/kg	20-35
		Wh/l	54-95
Tehotiheys		W/kg	250
Hyötysuhde		%	80
Itsepurkautuvuus		%/d	2
Elinikä		sykliä	800
Latausaika	SOC 90 %	h	8
	SOC 100 %	h	1

Lyijyakun soveltaminen autokäyttöön voi olla haasteellista akun latauksessa muodostuvan räjähdysriskin vedyn vuoksi. Akkujen lataaminen voi olla vaarallista sisätiloissa, jos riittävää tuuletusta ei ole järjestetty. Myös onnettomuustilanteissa akusta vuotava rikkihappo voi aiheuttaa vaaratilanteita.

3.2 Nikkeliakku

Lyijyakkujen jälkeen uutena tulokkaana akkuteknologian piiriin ilmestyi erilaisia nikkeli elektrodiin perustuvia akkuja. Tunnetuimpia nikkeliin perustuvia akkuja ovat nikkeli-metallihybridi ja nikkeli-kadmium akut. Nikkeli-kadmium akun etuna on suurempi lataus ja purkuvirta sekä pidempi elinkaari nikkeli-metallihybridiin verrattuna. Toisaalta nikkeli-metallihybridi tarjoaa paremman energiatiheyden eikä myöskään sisällä ympäristölle haitallisia aineita. (Gonzales et al. 1996) Taulukossa 3.2 on muutamia nikkeliakuille tyypillisiä suoritusarvoja.

Taulukko 3.2 Nikkeliakun tyypillisiä suoritusarvoja. (Larmin & Lowry 2003)

Energiatiheys		Wh/kg	40-55
		Wh/l	70-90
Tehotiheys		W/kg	125
Hyötysuhde			hyvä
Itsepurkautuvuus		%/d	0,5
Elinikä		sykliä	1200
Latausaika	SOC 60 %	min	20
	SOC 100 %	h	1

Nikkeliakulla on lyijyakuun verrattuna monia hyviä ominaisuuksia kuten parempi energiatiheys, elinikä ja hyötysuhde. Sähköautojen kannalta ajatellen heikkoutena on vaatimaton tehotiheys.

3.3 Litiumakku

Litiumakut edustavat uusinta akkuteknologiaa lyijy ja nikkeliakkujen joukossa. Litiumakkuja voidaan soveltaa monissa ympäröivissä sovelluksissa, kuten matkapuhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa. Teknologian etuna on akkukennon keveys ja suljettu rakenne. Taulukossa 3.3 on muutamia ensimmäisen sukupolven litiumakun suoritusarvoja.

Taulukko 3.3 Varhaisen litiumakun suoritusarvoja. (Larmin & Lowry 2003)

Energiatiheys		Wh/kg	90
		Wh/l	153
Tehotiheys		W/kg	300
Hyötysuhde			hyvä
Itsepurkautuvuus		%/d	0,3
Elinikä		sykliä	1200
Latausaika	SOC 100 %	h	2-3

Litiumakku on monessa mielessä parempi verrattuna lyijyakuun tai nikkeliakuun. Litiumakun energiatiheys, tehotiheys, hyötysuhde ja purkautuminen ovat parempia kuin nikkeli tai lyijyakulla. Nykyisillä litiumakuilla ero nikkeli ja lyijyakuun kasvaa vielä suuremmaksi. Myös elinikä ja latausaika ovat parantuneet kehityksen myötä.

Uudemmissa litiumpolymeeriakuilla voidaan saavuttaa huomattavasti parempia ominaisuuksia. Litiumpolymeeritekniikalla voidaan saavuttaa 146 Wh/kg (373 Wh/l) energiatiheys, joka on tavanomaisen litiumakun tehosiheyteen verrattuna lähes kaksinkertainen. Litiumpolymeeriakuille voidaan soveltaa pikalatausta, mutta akun elinikä riippuu akun kuormituksesta ja kapasiteetin käytöstä. (Salameh 2009)

Litiumtekniikkaan pohjautuvia akkuja on monia erilaisia ja valmistajia on useita. Akkujen ominaisuudet riippuvat käytettävästä tekniikasta ja akun materiaaleista. Tekniikasta ja materiaaleista riippuen voidaan saavuttaa korkea energiatiheys, tehosiheys tai kahden edellä mainitun ominaisuuden kompromissi. Erään valmistajan LiFePO_4 -akkumoduulilla voidaan saavuttaa 100 Wh/kg energiatiheys (European Batteries 2010). Eräs toinen valmistaja ilmoittaa litiumtitanaatti -akkukennon energiatiheydeksi 67 Wh/kg (Toshiba 2010). Edellä mainittujen tekniikoiden tehosiheydet poikkeavat toisistaan melko paljon. Litiumtitanaatti -tekniikalla voidaan saavuttaa suuri tehosiheys ja samalla hyvä syklikesto (6000 sykliä) (Toshiba 2010).

3.4 Sovellettavuus pikalataukseen

Nykyisten akkujen sovellettavuus pikalataukseen on haastavaa, mutta joitakin esimerkkejä toimivista ratkaisuista on olemassa. Esimerkiksi eräs valmistaja tarjoaa litiumtitanaatti -akkua, joka on erittäin hyvin soveltuva pikalataukseen. Valmistaja ilmoittaa, että akun virran vastaanottokyky latauksessa on 10 -kertainen nimellisvirtaan nähden ja latausaika 10 min (Toshiba 2010). Kyseessä on kuitenkin valmistajan markkinointiteksti eli aikaan on syytä suhtautua varauksella.

Akkujen yhteydessä käytetään usein kirjainta C kuvaamaan akun nimellistä virranantokykyä, kuten esimerkiksi edellä mainitun akun C arvo on 4,2 Ah. Näin ollen 10 C tarkoittaa, että edellä esitetyn esimerkin akkukennon pystyy vastaanottamaan 42 A latausvirran. Kyseinen litiumtitanaatti -akku perustuu litium -tekniikkaan, joten se on melko kevyt litiumakkujen tapaan. Yhden kennon ka-

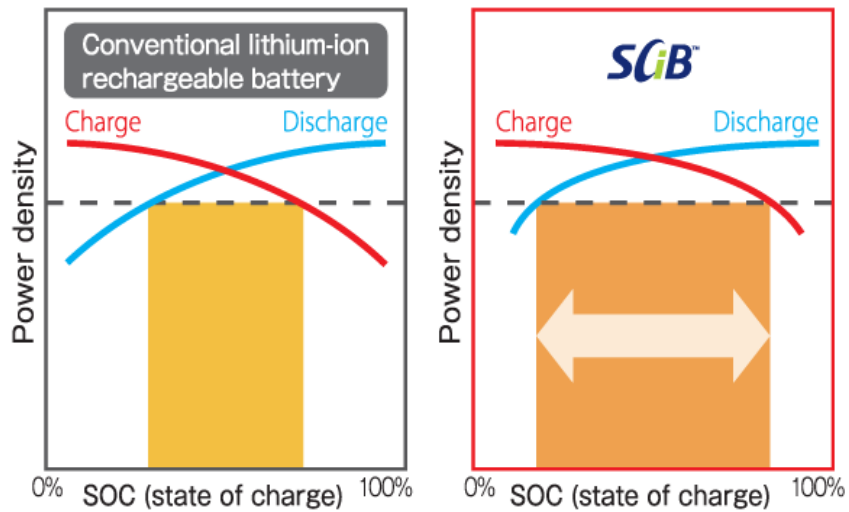
pasiteetti on 4,2 Ah jännitteen ollessa 2,4 V ja paino noin 150 g. Yhden kennon energiamäärä on näin ollen 10 Wh. Valmistaja ilmoittaa akulle myös hyvän lataussyklikeston, jopa 6000 sykliä 10 C pikalatauksella ja suurella purkuvirralla (Toshiba 2010). Uuden teknologian akkujen vanhenemisen nopeuden riippuvuus pikalataamisesta on vielä arvoitus, joten on vaikea miten paljon akkuja voidaan pikaladata ilman, että akun syklikestoisuus kärsii kohtuuttomasti.

Akkujen vanheneminen voidaan määritellä ns. kalenterivanhenemisena tai sykli-vanhenemisena. Kalenterivanheneminen on akun käytöstä riippumatonta akun rakenteen vanhenemista. Akulle voidaan ennustaa elinikä, jos akun ympäröivät olosuhteet tunnetaan. Syklivanheneminen tarkoittaa lataus- ja purkusyklien määrää jonka akku kestää siten, että alkuperäisestä kapasiteetista on 80 % jäljellä. Syklikeston vaikuttavia tekijöitä on monia, kuten esimerkiksi akun käyttöympäristö, lataus- ja purkuvirran suuruus ja akun kapasiteetin purkusyvyys. Valmistajat ilmoittavat syklikeston määrittelyt poikkeavat jonkin verran toisistaan, joten syklikestojen vertailu valmistajien kesken voi olla haastavaa. Myös pikalatauksen aiheuttamaa sykli-ian lyhenemistä ei ole useinkaan ilmoitettu valmistajan toimesta.

Akun pitkän iän vuoksi sovellettavuus sähköautokäyttöön on hyvä, koska näin ollen vältetään kalliin akun vaihtaminen. Sähköautossa kyseisillä kennoilla toteutettu 20 kWh akku painasi noin 300 kg ilman kennojen kytkentäjohtimia ja kotelointeja. Jos oletetaan, että akku voidaan varata 10 minuutissa täyteen, olisi laturin pystyttävä syöttämään vähintään 120 kW teho.

Sähköauton akun käytettävyyden kannalta alhainen käyttölämpötila on myös eduksi. Toshibaan akun luvataan suoriutuvan jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, joka on hyvin alhainen lämpötila perinteisten litium -akkujen kannalta. Yleensä litium-akun hyötysuhde kuitenkin laskee, kun lämpötila viedään lähelle akun kriittistä alinta toimintapistettä (Salameh 2009). Kuvassa 3.2 on havainnollistettu erään akun kuormitettavuutta varauksen ääriladoissa. Esityksestä voidaan havaita, että

akun kuormitettavuus ja ladattavuus vaikuttaisi olevan tavanomaista akkua parempi.



Kuva 3.2 Valmistajan esittämä vertailu tavanomaisen litium-akun ja uudemman tekniikan litium-titanaatti-akun kuormitus- ja purkutehotehokkuuksista. (Toshiba 2010)

Myös MIT:n tutkimus hieman vanhemman tekniikan litiumpolymeeriakuista tukee li -tekniikalla valmistettujen akkujen soveltuvuutta sähköautokäyttöön ja pikalataukseen. Tutkimuksessa testattujen litiumpolymeeriakkujen todettiin kykenevän pikalataukseen 18 minuutin latausajalla ja kestävän pikalatausta noin 1000 sykliä. (Salameh 2009) Edellisessä kappaleessa esitetty Toshiban SCiB -akku poikkeaa kuitenkin MIT:n tutkimuksessa käytetyistä merkittävästi, joten suoraa vertailua ei voida suorittaa. Toshiban valmistustekniikka mahdollistaa akun kuormittamisen ilman nopeaa rappeutumista, kun taas polymeeritekniikalla valmistetun akun suorituskyky on muuten samaa tasoa kuin titanaatti -tekniikalla valmistetun akun, mutta se rappeutuu nopeammin.

Markkinoilla on myös LiFePO_4 -akkuja eli litium-rauta-fosfaatti -akkuja, joiden energiatiheys on edellä esitettyjen SCiB akkujen suhteen jopa kaksinkertainen. Eräs akkujärjestelmävalmistaja ilmoittaa LFP -akkumoduulin energiatiheyden olevan jopa 100 Wh/kg, joka on yli kolmanneksen suurempi litium-titanaatti -akkukennon 67 Wh/kg (European Batteries 2010; Toshiba 2010). Näin ollen edellä mainituista LFP -akkumoduuleista valmistettu 20 kWh auton akkupaketti painaisi vain noin 200 kg eli kolmanneksen vähemmän kuin aiemmin esitetty

litium-titanaatti -akku. Akkujen tehotiheyttä ei voida vertailla, koska LFP -akkumoduulin valmistaja ei ilmoita akun sallittua kuormitus- tai latausvirtaa. Litium-titanaatti -akkukennon tehotiheys lyhyellä kuormituksella on luokkaa 600–700 W/kg (Toshiba 2010).

3.5 Tulevaisuuden näkymät

Akkujen kehitys jatkuu usean valmistajan toimesta. Tulevaisuudessa on odotettavissa yhä parempia ja edullisempia akkuja. Tekniikan kehityksen nopeuden ja hinnan muodostumista on vaikea ennustaa. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että akkujen valmistuksen volyymin lisääntyessä voidaan odottaa merkittävää hinnan alentumista. Eräs autonvalmistaja ilmoittaa nykytekniikan akkujen hinnan olevan noin 450–600 \$/kWh (Piene 2010). Monet muuta tahot ovat ilmaisseet akkujen hinnan olevan tulevaisuudessa noin 600 €/kWh. Todellisen akkujen markkinahinnan määrittäminen voi olla haastavaa, koska suuren volyymin kaupat tehdään akkujen valmistajan ja autojen valmistajan kesken. Hintatietoja ei ole juurikaan saatavilla.

3.6 Turvallisuus

Autoissa käytettävien akkujen turvallisuus on tärkeä tekijä akkujen valinnassa. Akulla voi olla paljon hyviä ominaisuuksia, mutta jos akun rakenne ei salli sen turvallista käyttöä autossa, akku ei voida soveltaa autokäytössä. Akun turvallinen käyttö edellyttää että akun lämpötilaa voidaan kontrolloida ja seurata luotettavasti, jotta akku ei pääse ylikuumentamaan ja aiheuttamaan vaaraa auton käyttäjille. Esimerkiksi litiumakuille on tyypillistä, että niiden ominaisuudet muuttuvat akun ikääntyessä ja näin ollen akut voivat aiheuttaa vaaratilanteita.

Akkujen pikalataus on myös eräs tekijä, jossa turvallisuus on hyvä huomioida, koska uusilla akuilla lataustehot voivat olla pikalatauksen yhteydessä jopa 100 kW luokkaa. Näin suurilla tehoilla akkujen hyvinkin pienet häviöt aiheuttavat suuria lämpötiloja ja kuumentavat akustoa. Lataus onkin toteutettava niin, että virhetilanteessa latausvirta katkeaa automaattisesti ja estää vaaratilanteen syntymisen.

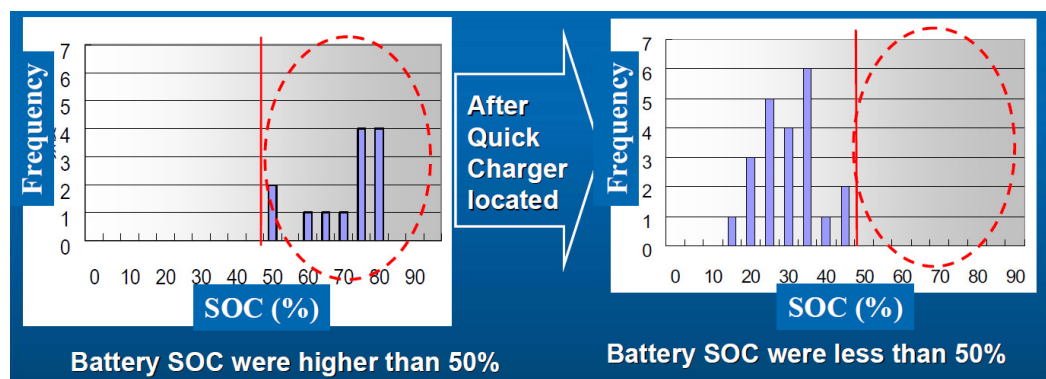
4 Auton käyttö

Sähköautojen lisääntyminen on uusi haaste kuormituksen mallintamiselle, koska perinteiset tyyppikuormakäyrät eivät tunne sähköautoilun käsitettä. Tulevaisuuden kuormanmallinnuksessa onkin huomioitava sähköautojen ja lataamisen erityispiirteitä. Mallinnuksessa on nyt pyrittävä ymmärtämään sähköautojen kuormituksen luonne, jotta tulevaisuuden verkkolaskennan pohja olisi turvattu. Sähköauto on kuorman mallinnuksen kannalta haasteellinen kohde, koska sen kulutuspaikka ja -aika voivat vaihdella. Perinteisen kuormanmallinnuksen tapauksessa kuormien liikkumista ei ole tarvinnut huomioida millään tavalla, koska peruskuorma on koostunut pääasiassa sähkölämmityksestä ja muusta kotitalouksien kuormituksesta. Sähköautojen lataukseen liittyy myös haasteita kuormituksen ajoittumisen kannalta. Autot liikkuvat paikasta toiseen tiettyinä ajankohtina ja lataus voi näin ollen tapahtua vaikeasti ennustettavassa paikassa tuntemattomalla ajanhetkellä. Mallintaminen on kuitenkin mahdollista, kun tehdään joitain oletuksia joilla tilannetta yksinkertaistetaan siten että muuttujien määrä pienenee käsiteltäväksi ja osa riittävä osa muuttujista on jollain tavalla tunnettuja.

Sähköautojen latauskuorma on mittava haaste sähköverkolle, joten mallintamiseen on etsittävä järkevä malli. Autojen käytöstä on tiedettävä keskimääräiset ajomatkat, lähtö- ja kohdepaikat sekä mahdollisimman tarkka ajankohta auton käytölle. Näin ollen kulutuksen ennustaminen voi olla mahdollista kohtuullisella tarkkuudella.

Ihmisten työpaikkojen sijainti on merkittävä tekijä auton käytön kannalta, koska näin voidaan selvittää missä auto on pysäköitynä päiväsaikaan ja missä yöllä. Työpaikkojen perusteella voidaan myös ajoittaa kuormitus hyvin tarkkaan tietyille ajanjaksolle, kun tiedetään ovatko työpaikat vuorotyöpaikkoja vai tavallisia päivätyöpaikkoja. Latauksen voidaan olettaa tapahtuvan työpaikalla työmatkan jälkeen ja lisäksi töistä paluun jälkeen kotona.

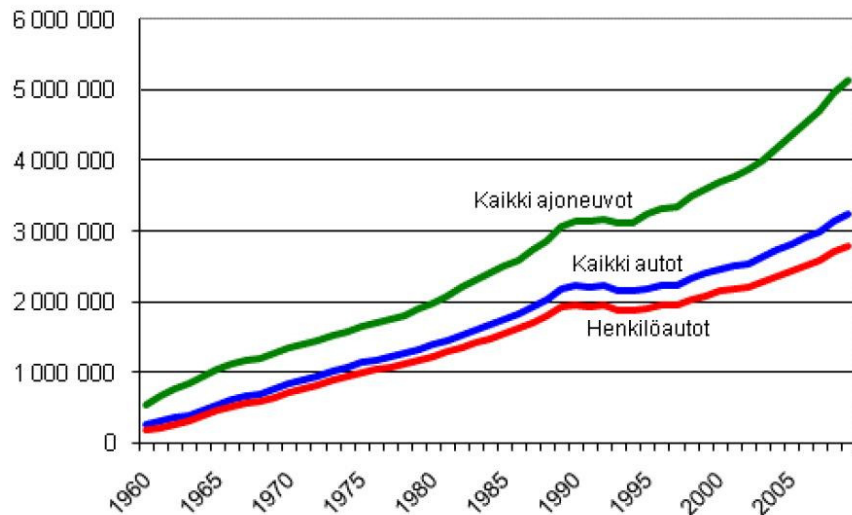
Autojen käyttömäärien ja paikkojen tunteminen ei kuitenkaan kerro koko totuutta latauspaikkojen kuormituksesta, koska ihminen on inhimillinen toimija, eikä käyttäytymistä voida tarkasti ennustaa. Esimerkiksi Japanin Tokiossa on kokeiltu pikalatausasemia pienessä mittakaavassa vuoden 2009 aikana. Kokeilussa havaittiin, että kun kaupungin alueelle asennettiin useita pikalatausasemia, varikolle saapuvien vuokra-autojen akkujen varauksen olivat pienemmät kuin ennen pikalatausasemien asentamista. Autojen käyttösäteen havaittiin myös kasvaneen pikalatausasemien asennuksen myötä. (CHAdEMO 2010) Käytännössä tämä tarkoittaa, että vaikka pikalatausasemia oli käytettävissä, niitä ei välttämättä käytetty. Auton akkukapasiteetti oli mahdollista käyttää tarkemmin, koska pikalatauksen mahdollisuus varauksen loppuessa olisi ollut olemassa. Kuvassa 4.1 on esitetty autojen akkujen lataustason muutos ennen ja jälkeen latauspisteiden rakentamisen. Kokeilu antaa ymmärtää, että pikalatausasemien olemassaolo vaikuttaa ihmisten ajokäyttäytymiseen hyvinkin paljon.



Kuva 4.1 Sähköautojen pikalatauspisteiden vaikutus varikolle palaavien autojen akkuvaraukseen. Akkujen latausaste on merkitty SOC (State of Charge). (CHAdEMO 2010)

Tilastokeskuksen tutkimuksen mukaan Suomessa oli vuonna 2009 3,25 milj. autoa, joista 2,78 milj. oli henkilöautoja. Kuvassa 4.2 on nähtävissä rekisteröityjen autojen määrä vuodesta 1960 vuoteen 2009 asti. Vuoden 2008 tilanteeseen verrattuna autojen määrä on kasvanut 3,1 %. (Tilastokeskus 2010,a) Kuvasta 4.2 voidaan todeta, että autokannan määrän trendi on selkeästi kasvava. Tilastojen perusteella tehtyihin tulevaisuuden ennusteisiin on kuitenkin syytä suhtautua

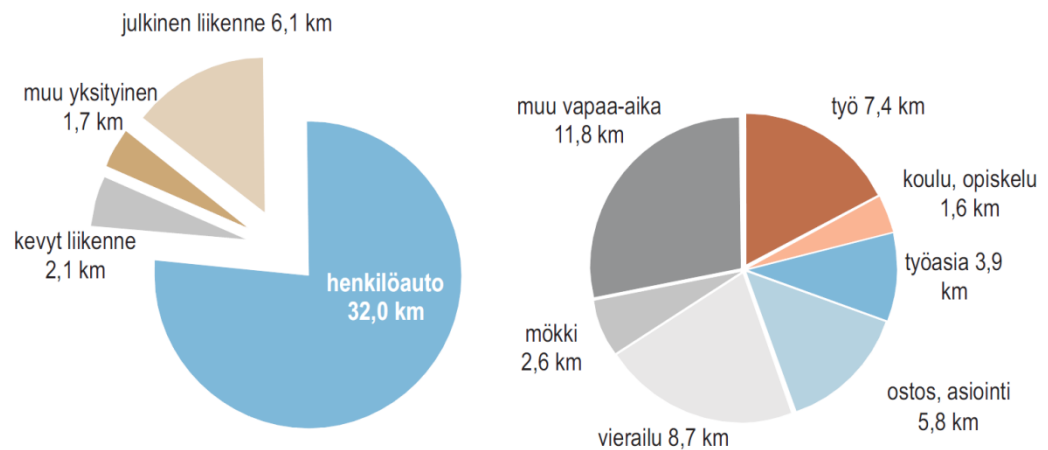
varauksella, koska tulevaisuuteen liittyy useita epävarmuustekijöitä. Autojen määrän kasvu ei välttämättä jatku, esimerkiksi verotuksellisista syistä tai julkisen liikenteen kehittymisen myötä. Ihmisten liikkumistottumuksetkin voivat muuttua arvaamattomalla tavalla työpaikkojen tai muiden asioiden johdosta.



Kuva 4.2 Ajoneuvokanta Suomessa 1960 – 2009. (Tilastokeskus 2010,a)

4.1 Keskimääräiset ajomatkat

Henkilöauton keskimääräistä ajomatkaa voidaan käyttää lähdetietona sähköauton päivittäisen varaustarpeen arvioinnissa. Oma auto on Suomessa yleisin kulkuväline, kuten kuvassa 4.3 asiaa havainnollistetaan. Keskimääräinen päivittäinen liikkumismatka on 42 km/hlö/d, josta 32 km eli noin 76 % ajetaan henkilöautolla (Henkilöliikennetutkimus 2006). Henkilöliikennetutkimuksen mukaan henkilöauton käyttö on lisääntynyt edelliseen kuuden vuoden takaiseen tutkimukseen verrattuna 6 % (Henkilöliikennetutkimus 2006). Tutkimus antaa olettaa, että henkilöauton käyttömäärän trendi on kasvava. Myös tilastokeskuksen kuvassa 4.2 esitetty ajoneuvokantatilasto tulee kasvavaa trendiä.



Kuva 4.3 Kotimaan matkasuoritteet jaoteltuna eri kulkuvälineillä tehtäviin matkoihin sekä matkan tarkoituksen mukaan. (Henkilöliikennetutkimus 2006)

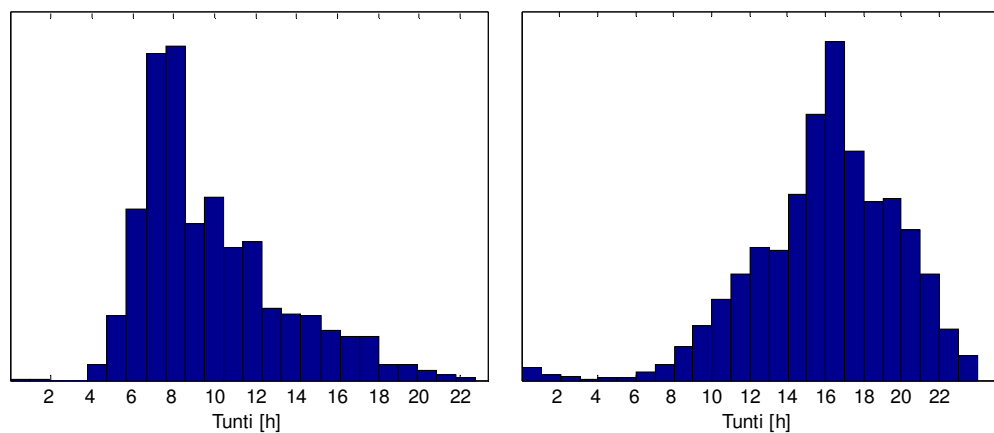
Latauksen mallintamisen vuoksi on tiedettävä myös keskimääräinen ajosuorite yhtä autoa kohden. Suomessa oli vuonna 2004 4,87 milj. yli 6 -vuotiasta ihmistä ja 2,4 milj.) henkilöautoa eli keskimäärin yksi auto kahta ihmistä kohden (Tilastokeskus 2010,a). Henkilöauton kuljettajana toimiva ihminen liikkuu henkilöautolla keskimäärin 25,4 km/d (Henkilöliikennetutkimus 2006). Näin ollen voidaan arvioida keskimääräisen ajosuoritteen yhtä autoa kohden olevan 52 km/d. Arvioon on kuitenkin suhtauduttava kriittisesti, koska autojen määrän taloutta kohden ei voida olettaa jakautuvan tasaisesti maantieteellisesti. Suurissa taajamissa on todennäköisesti vähemmän autoja henkilöä kohden kuin harvaan asutulla maaseudulla. Luku on kuitenkin suuntaa antava ja hyvä arvio kuormituksen mallintamisen kannalta.

Liitteessä 1 on havainnollistettu ajosuoritteiden jakautuminen vuorokauden ajalle. Kuvasta voidaan havaita, että ajosuoritteet tapahtuvat pääasiassa päivällä joi-takin poikkeuksia lukuun ottamatta. Ajosuoritteiden määrän enemmistön voidaan lisäksi havaita painottuvan pääasiassa aamulle työmatkaliikenteen aikaan ja illalle töistä paluuliikenteen aikaan.

Liitteessä 2 on liitteen 1 kaltainen kuvaaja, jossa on merkitty ainoastaan kotiin päättyvien matkojen loppumisajankohta. Näin voidaan havainnollistaa la-

tausajankohdan painottuminen yksinkertaisella tavalla. Kuvasta voidaan havaita, että kotiin saapuminen painottuu pääasiassa töistä paluun ajalle klo 16 jälkeen. Kuvaajan perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että sähköautojen latauskuorma painottuu illalle, jos lataus tapahtuu ainoastaan kotona.

Liitteen 2 tulosten perusteella voidaan esittää kuvan 4.4 kaltainen jakauma kotiin saapumisaikojen painottumisesta tunnin resoluutiolla. Samassa kuvassa on esitetty myös jakauma kodista lähtöajoista.



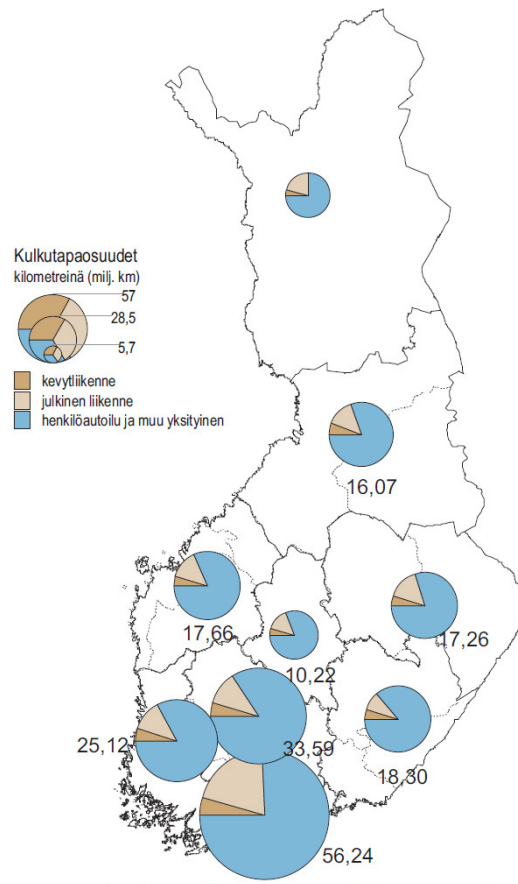
Kuva 4.4 Henkilöauton kuljettajan kotoalähtöaikojen ja kotiin saapumisaikojen jakaumat tunnin resoluutiolla henkilöliikennetutkimuksen raakadatasta laskettuna.

Jakaumista voidaan todeta, että kotoa lähdöt painottuvat pääosin aamun tunneille ja kotiin paluut painottuvat illan tunneille. Edellisten jakaumien perusteella vaikuttaa todennäköiseltä, että sähköautoa ei ladata kotona päivällä. Lataus painottuu illalle ja yölle riippuen lataustarpeesta, kotiin saapumisen ajasta ja lataustavasta. Kuvassa esitetyt jakaumat käsittävät koko tarkasteltavan datan mukaan lukien viikonloput.

Henkilöliikennetutkimuksen aineiston perusteella voidaan laskea myös jokaiselle tunnille tuntikohtaiset jakaumat ajomatkojen pituudelle. Tilastolliset työkalut mahdollistavat sähköauton latauskuorman ajoittumisen ja suuruuden mallintamisen hyvässä tapauksessa varsin kelvollisella tarkkuudella. Aihe vaatii kuitenkin syvempää tarkastelua, eikä asiaa tarkastella tämän diplomityön yhteydessä.

4.2 Ajojen jakautuminen maantieteellisesti

Ajojen maantieteellinen jakautuminen vaikuttaisi olevan sidoksissa asukastiheyteen, kuten kuvasta 4.5 voidaan havaita. Suurin liikennemäärä painottuu pääkaupunkiseudulle. Yksityisliikenteen jakautumisessa on myös havaittavissa painotumista harvemman asukastiheyden alueille Lappia lukuun ottamatta. Pääkaupunkiseudulla julkisen liikenteen käyttö vaikuttaisi olevan suurempaa kuin muualla Suomessa Lappia lukuun ottamatta.



Kuva 4.5 Kulutapaosuudet Suomessa maantieteellisesti jaoteltuna. (Henkilöliikennetutkimus 2006)

Kuormitusta mallinnettaessa on hyvä huomioida kulutapaosuudet eri alueilla, jotta kuormituksen mitoitus olisi perusteltua. Pääkaupunkiseudulla sähköhenkilöautojen lataustarve asukasmäärän suhteutettuna on hieman pienempi kuin muualla Suomessa. Verkon kuormitus on oletettavasti kuitenkin suurempi, koska liikennöintimäärän tiheys on huomattavasti suurempi kuin muualla Suomessa.

5 Lataustekniikka

Sähköautojen lataustekniikan kehitys on ollut hidasta osin akkutekniikasta ja standardoinnista johtuen. Latauksen kesto nykypäivän tekniikalla voi olla tuntien tai jopa minuuttien luokkaa, kun ladataan sähköauton akkupaketti tyhjästä täyteen. Latauksen nopeutta rajoittaa pääasiassa akkutekniikka, koska sähköautoihin sopivat kevyet akut eivät kykene luovuttamaan tai vastaanottamaan suuri tehoja kuten esimerkiksi lyijyakku. Toistaiseksi ei ole onnistuttu kehittämään akkua, jonka nopea lataaminen ei kiihdyttäisi akun ikääntymisprosessia kohtuuttomasti.

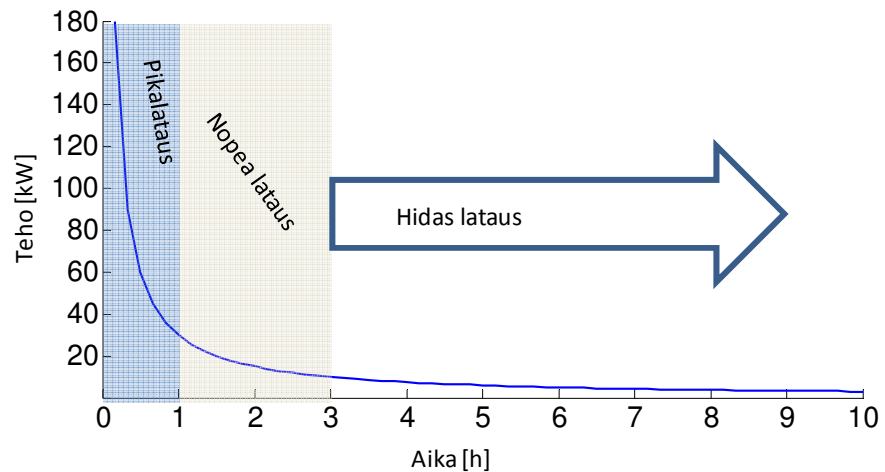
Uusimpien kokeiden mukaan 100 Ah litium kennon lataus voidaan suorittaa 18 minuutissa tyhjästä 80 % varaukseen asti (Salameh M. 2009). Käytännössä tämä tarkoittaa, että latausvirta on noin 300 A, akkukennon jännitteen ollessa noin 4,2 V. Sähköautossa voisi olla vastaavia kennoja esimerkiksi 50 kappaletta. Näin ollen latauspisteen pitäisi pystyä tuottamaan 60 kW luokkaa oleva teho, jotta tyhjälle akulle voitaisiin saavuttaa 80 % varaustaso 18 minuutissa. Markkinoilla olevat akut ovat myös riittävän kehittyneitä pikalatauksen kannalta. Esimerkiksi erään valmistajan litiumtitanaatti akku voidaan ladata tyhjästä täyteen varaukseen jopa alle 10 minuutissa (Toshiba 2010). Toinen valmistaja tarjoaa litium akkua, joka on toteutettu nanofosfaatti -tekniikalla. Suositeltu nopein pikalatausaika on 15 minuuttia (A123 2010). Valmistajat eivät kuitenkaan ilmoita, millä tavoin edellä esitetyt latausajat vanhentavat akkuja.

Lataustekniikan kehittymisen hidasteena on lisäksi lukuisa joukko erilaisia latauspistokestandardeja ja maakohtaisia turvallisuusmääräyksiä. Toiseen maahan suunniteltu latauspiste ei välttämättä täytä kaikkien maiden turvallisuusohjeistusta. Pahimmassa tapauksessa turvallisuusmääräyksissä voi esiintyä myös ristiriitaisuuksia joidenkin asioiden toteutuksen kannalta.

Pohjois-Amerikassa on tällä hetkellä käytössä SAE J1772 standardoitu sähköauton latauspistoke jolla on mahdollista 240 V jännitteen ja 80 A virran käyttö la-

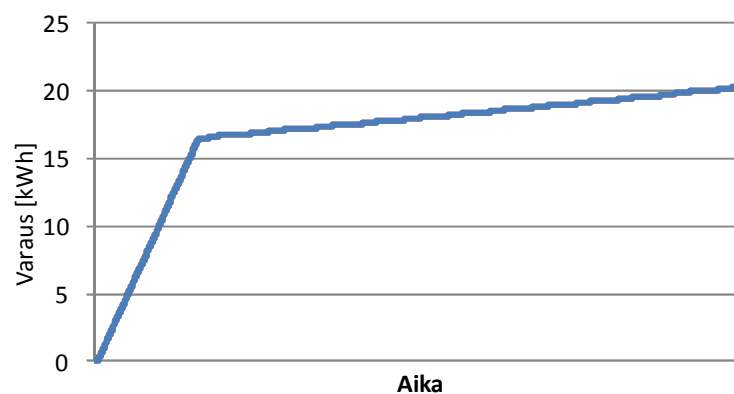
tauksessa (SAE 2010). Euroopassa on odotettavissa, että käyttöön tulee kolmivaiheinen ns. Mennekes -pistoke, joka mahdollistaa 400 V ja 63 A virran syöttämisen. Kyseisestä pistokkeesta ei ole vielä olemassa standardointia, joten pistokkeen yleistyminen on epävarmaa. EU on kuitenkin ajamassa yhtenäistä latausinfrastruktuuria Eurooppaan (EUbusiness 2010). Etuna Amerikkalaiseen standardoituun pistokkeeseen verrattuna voidaan mainita merkittävästi suuremman tehonsyöttömahdollisuuden vuoksi. Yhtenä latauspistokkeen vaihtoehtona on myös tasavirtapistoke, jolla voidaan käyttää suurta tehoa suurella virralla lyhyen latausajan saavuttamiseksi. Tasavirtalatauksen tapauksessa autossa ei tarvitse olla tehoelektroniikkaan tasasuuntausta varten vaan latauskalusto olisi kokonaan auton ulkopuolella erillisenä latauspisteenä. Näin ollen autonvalmistuskustannukset olisivat myös pienemmät. Tämä ei kuitenkaan poista ongelmaa akun eliniän suhteen.

Kuvassa 5.1 on havainnollistettu latausajan merkitystä suhteessa vaadittavaan latauspisteen tehoon. Latauspisteen teho on kääntäen verrannollinen latausajan pituuteen, joten latausajan pituudella on hyvin suuri merkitys latausaseman ominaisuuksien kannalta. Käytetyssä esimerkissä on oletettu, että laturin on siirrettävä energiaa 30 kWh. Näin ollen 10 minuutin latausaika vaatisi 180 kW tehon, kun vastaavasti 10 h latausajan vaatima keskiteho on huomattavasti pienempi 3 kW.

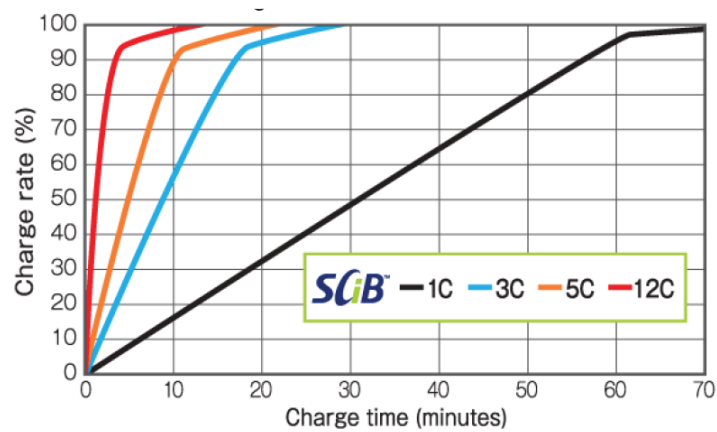


Kuva 5.1 30 kWh varauksen latausteho esitettynä ajan funktiona. Latausteho on kääntäen verrannollinen latausajan pituuteen.

Latauksessa on lisäksi huomioitava akkutekniikan asettamat rajoitteet. Akun lataamista ei välttämättä voida suorittaa kokoajan samalla nopeudella vaan latausnopeutta on pienennettävä tietyn raja-arvon jälkeen. Kuvassa 5.2 on esitetty erään sähköauton latausprofiili. Kuvasta voidaan todeta, että latausnopeus hidastuu merkittävästi sen jälkeen, kun akku on saavuttanut noin 80 % kokonaisvarauksesta. Akun täyteen varaamiseksi loppu lataus on suoritettava huomattavasti hitaammalla nopeudella. Tämän kaltainen latausprofiili on hyvin tyypillinen litiumakuille.



Kuva 5.2 Erään sähköauton latausprofiili ajan funktiona. Latauksen nopeus hidastetaan, kun akun varaus on noin 80 % kokonaisvarauksesta. (VTT 2010)



Kuva 5.3 Erään valmistajan akun latausaste ajan funktiona eri latausvirroilla. (Toshiba 2010)

5.1 Lataustyyppien luokittelu

Lataustyyppien luokitteluun ei ole yksiselitteistä tapaa, mutta esimerkiksi Pohjois-Amerikassa lataustyypit on luokiteltu kolmeen osaan latausvirran perusteella. Amerikkalainen malli on suuntaviivana myös Euroopassa, kun puhutaan latausasemien nopeudesta. Seuraavissa kappaleissa kuvataan eräs jaottelu latausnopeuksien mukaan.

5.1.1 Hidas lataus (Level 1)

Taso 1 lataus on hitain lataus tapa, joka voidaan totuttaa esimerkiksi kotitalouksissa ilman muutoksia sähköverkkoon tai omakotitalon sähköjärjestelmään. Lataus on pääsääntöisesti yksivaiheista ja tapahtuu vaihtovirralla jännitetasoilla 120–240 V. Latausaika on akun akkukapasiteetista riippuen useiden tuntien luokkaan aina yli kymmeneen tuntiin.

5.1.2 Nopea lataus (Level 2)

Taso 2 lataus on keskinopea lataus, joka on pääsääntöisesti kolmivaiheista ja hyödyntää 400 V pääjännitettä. Latauksen teho on sulakekoosta riippuen 10–20 kW luokkaa. Latausaika on muutamien tuntien luokkaa akkukapasiteetista riippuen.

5.1.3 *Pikalataus (Level 3)*

Taso 3 lataus on pikalatausta, jossa teho voi olla yli 50 kW luokkaa lataus- ja akkutekniikasta riippuen. Latausaika on alle 30 minuuttia. Latauksella ei voida yleensä saavuttaa akkukapasiteetin täyttä varausta ilman, että latausta hidastetaan lopussa. Hitaalla loppulatauksella latausaika pitenee.

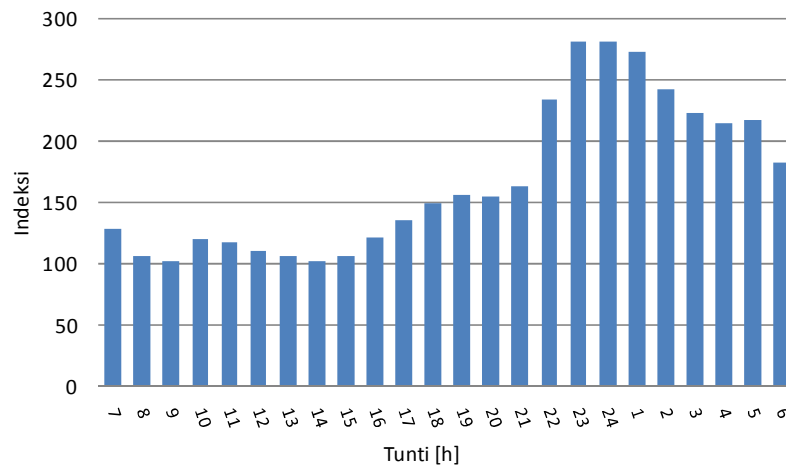
5.2 **Sovellettavuus pienjänniteverkossa**

Pohjoismaista sähköverkkoa voidaan pitää melko sopivana sähköautojen lataamisen kannalta, koska kotitalouksissa on yleensä mahdollisuus kolmivaiheiseen kytkentään. Verkon mitoitus on myös sopiva suurilla kuormilla ajatellen, koska Pohjoismaissa taloja joudutaan lämmittämään talvella. Lämmitysratkaisut ovat erilaisia, mutta voidaan karkeasti yleistää, että Pohjoismaissa sähkölämmitys on asettanut verkolle suuremmat vaatimukset verrattuna eteläiseen Eurooppaan. Edellä esitettyä ajatusta ei kuitenkaan voida soveltaa taajamissa, koska suomalaiset taajamat ovat usein kaukolämpöverkossa ja näin ollen sähköverkko on mitoitettu eri tavalla. Taajamien pienjänniteverkoille on kuitenkin ominaispiirteistä, että talojen pihalle on asennettu autojen talvilämmitykseen tarkoitettuja pistokepaikkoja. Pistokepaikat voisivat olla hyvinkin potentiaalisia sähköautojen latauspisteitä puhuttaessa hitaasta yksivaiheisesta latauksesta. Mahdollinen pistokepaikkojen soveltaminen sähköautojen latauspisteinä on hyvä tarkastella.

Lataus voidaan toteuttaa yksivaiheisena tai kolmivaiheisena käyttäjän tarpeiden mukaan. Yksivaiheisella latauksella rajoittavana tekijänä on usein 16 A sulake, joka rajoittaa latauksen tehon 230 V jännitteellä noin 3,6 kW. Kolmivaiheisella latauksella voidaan saavuttaa sulakkeen koosta riippuen huomattavasti suurempia tehoja. Esimerkiksi kolmivaiheinen lataus 16 A sulakkeella 400 V pääjännitteellä mahdollistaa jopa 11 kW lataustehon. Kolmivaiheisen latauksen teho on samalla sulakekoolla kolminkertainen ja näin ollen latausaika on myös kolmasosa yksivaiheisen latauksen latausajasta. Tässä työssä laskettavissa esimerkeissä käytetään yksivaiheiselle lataukselle 3 kW tehoa ja kolmivaiheiselle lataukselle 10 kW tehoa.

5.2.1 Omakotitalot

Omakotitaloissa asuvat ovat etuoikeutetussa asemassa sähköauton latauksen kannalta, koska omakotitalon sähkönkulutus ja pääsulakkeiden koko on useasti mitoitettu niin, että esimerkiksi 16 A yksivaiheinen kuorma ei vielä aiheuta ongelmia. Lataus voidaan siis suorittaa omakotitaloasujan näkökulmasta lähes minä ajankohtana tahansa. Tämä edellyttää kuitenkin sellaista kotitaloutta, jossa sähkölämmityskuorma ja sähkösauna ovat vuorottelun alaisina. Pienjänniteverkon ja muuntopiirin lähdön kannalta tilanne voi olla hieman haasteellisempi, jos sähköauton omistajia on paljon saman johtolähdön alueella. Johtolähtö voi ylikuormittua ja jännitteenalenemat voivat kasvaa kohtuuttoman suuriksi. Ylikuormituksen takia myös häviökustannukset johtolähdöllä kasvavat, joka puolestaan voi olla kannuste verkon saneeraukselle. Kuvassa 5.4 on esitetty tyypillisen varaavalla sähkölämmityksellä varustetun omakotitalon sähkönkulutus vuorokauden ajalta. Kuvassa näkyy selvästi, että kuormitus ajoittuu pääasiassa yölle, kun sähkölämmitykset kuormittavat verkkoa.



Kuva 5.4 Sähkölämmitteisen omakotitalon tyypikkäyrän indeksisarja (viikkoparin 1 indeksisarja ja talviarkipäivän indeksisarjan yhdistelmä). (Kuormitustutkimus 1992) (100 = keskiteho koko vuodelta)

Kuvassa 5.4 nähtävä kuormituskäyrä on haasteellinen hitaan latauksen kannalta, koska lataus ajoittuisi todennäköisesti pääasiassa yölle, jolloin autot ovat omakotitalojen pihoissa. Päivän ajaksi autojen latauksen aiheuttama kuormitus poistui-

si, koska autojen pääasiallinen käyttö on työmatkojen tai päivittäistavarakaupoissa asioinnin kulkuväline (Henkilöliikennetutkimus 2006).

5.2.2 Rivitalot ja kerrostalot

Rivitalojen ja kerrostalojen etuna on valmiiksi rakennetut parkkipaikat, joissa on autojen esilämmitystä varten rakennettu sähköverkko. Lämmitysverkot on pääasiassa mitoitettu yksivaiheiselle 10 A tai 16 A kuormille riippuen verkon rakennusajankohdasta. Esimerkiksi VVO suosittaa vuokratalojen suunnitteluohjeessa, että ryhmäjohdon mitoituksessa käytetään ohjearvoa 1,5 kW/autopaikka ja sulakkeen mitoitukselle vastaava ohje on 1 kW/autopaikka (VVO 2009). Useimmissa lämmitystolpissa on lisäksi kellokytkimet, jotka rajoittavat virransyötön kestoa. Joillakin parkkialueilla verkko voi olla myös vuoroteltu siten, että vain osa lämmityspistokkeista on käytössä yhtä aikaa.

Vaikka kiinteistöjen lataukseen sovellettavissa oleva verkko onkin hyvin kattava, vaaditaan silti joitakin muutoksia. Vuoroteltujen verkkojen mitoitus on usein riittämätön sähköautojen latausta ajatellen. Vuorottelun hyödyntäminen myös latauksessa voi olla joissain tapauksissa mahdollista, jos vuorottelu voidaan toteuttaa älykkäästi. Myös yksittäisten lämmityspisteiden kellokytkimet on korvattava jatkuvan syötön mahdollisuudella, jotta auton elektroniikka voi huolehtia latauksen oikeasta ajasta ja tehosta.

5.2.3 Joukkoliikenteen liityntäpysäköinti ja markettien parkkipaikat

Lataus voidaan toteuttaa periaatteessa missä tahansa paikassa, jossa autoja pysäköidään paljon. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun laitamilla olevat joukkoliikenteen liityntäpysäköintialueet soveltuisivat lataukseen oivallisesti, koska autoja voidaan pysäköidä pitkiäkin aikoja näillä alueilla. Pääkaupunkiseudulla on tällä hetkellä noin 50 liityntäpysäköintialuetta yhteensä jopa 5200 autolle ja vuoteen 2020 mennessä paikkoja on tarkoitus lisätä 12000 autopaikkaan (Motiva 2009). Kyseessä on siis varsin potentiaalinen latauspaikka autoille. Ongelmana on kuitenkin latausinfrastruktuurin puuttuminen, joten latauksen mahdollistaminen vaatisi merkittäviä investointeja alueiden sähköverkoille. Latauksesta voitaisiin

kuitenkin periä pientä maksua, joten investoinnin kustannukset saataisiin sitä kautta ajan myöten takaisin, ainakin osittain.

Lataus voidaan voidaan periaatteessa toteuttaa samalla tavalla markettien parkkipaikoilla tai parkkitaloissa kuten liityntäpysäköinnin yhteydessä. Valmis latausinfrastruktuuri puuttuu, mutta siihen investoiminen voisi osoittautua kannattavaksi sähköautojen yleistymisen myötä.

5.3 Sovellettavuus keskijänniteverkossa

Keskijänniteverkon yhteyteen kytkettävä kuormitus olisi todennäköisesti sähköautojen pikalatausasema. Keskijänniteverkko pystyisi todennäköisesti käsittelemään lisäkuormaa jonkin verran, mutta autojen määrän lisääntyessä kuormituksen kasvu aiheuttaisi saneerauspaineita. Latausaseman yhteyteen olisi rakennettava pienjänniteliityntä keskijänniteverkkoon jonka teho voisi olla 10 rinnakkaisen latauspisteen kanssa 2 MW luokkaa. Kuormitus vastaa suuruudeltaan tyypillisen pienen johtolähdön kuormitusta, joten kuormaa voitaneen pitää hyvin merkittävänä ja jatkotarkastelua aiheellisena.

Kuorman suuruuden ja luonteen vuoksi verkolle asetetaan huomattavat vaatimukset. Suurin kuorma keskittyy mahdollisesti liikenteen ja ihmisten liikkumisen mukaan tietyille vuorokauden tunneille. Toisaalta esimerkiksi yön tunteina, kun ihmisten liikkuminen on vähäisempää, aseman kuormitus on hyvin pientä tai lähes olematonta. Kuormituksen luonteen vuoksi voi olla järkevää tarkastella myös mahdollisuutta toteuttaa kuorman tasaamista mikrotuotannolla tai energia-varastoilla.

Tuulivoima ja aurinkovoima voivat olla hyviä vaihtoehtoja asemalle kytkettäväksi pientuotannoksi. Esimerkiksi tulevaisuuden uudella aurinkokennotekniikalla voidaan saavuttaa jopa 50 % hyötysuhde, joten aurinkovoiman kilpailukyky voi olla huomioon arvoinen (Technology Review 2010). Nykyisten aurinkokennojen hyötysuhde on vielä melko huono, joten suuren tehon saavuttamiseen tarvitaan suuri pinta-ala. Pientuotannon rakentamisen aiheuttaa kuitenkin kus-

tannuksia, joten ajatuksen kannattavuutta ja kokonaisuhyötyä on syytä tarkastella huolella.

Aseman kuorman tasapainottamiseen voitaisiin myös käyttää akkuja, joita varattaisiin yön aikana ja purettaisiin suurimman kuormituksen aikana. Näin ollen latausaseman kuormitus verkolle tasaantuisi ja huipputeho pienenesi. Akkukapasiteetin rakentamisen asemalle aiheuttaa myös merkittäviä investointeja, joten kokonaisuutta on hyvä tarkastella myös akkujen tapauksessa kuten mikrotuotannossakin. Akkujen käyttö energiavarastoina nykyisillä hinnoilla on haasteellista.

Latausasemaa tarkasteltaessa on syytä mainita myös auton akkujen vaihtoasema. Akkujen vaihtotekniikka tarjoaisi mahdollisuuden kuorman jakamiseen pidemmälle ajanjaksolle, mutta asemalla pitäisi olla melko suuri määrä akkuja. Asemalla olevien akkujen lataus voitaisiin toteuttaa älykkäästi eli akkuja ladattaisiin, kun kuorma on pienempi. Akut voisivat toimia samalla myös varastokapasiteettina, jota voitaisiin hyödyntää suurimman kuormituksen aikana. Asiaa on tutkittu erään yrityksen toimien yhteydessä (Better Place 2010). Akkujen vaihtamiseen liittyy kuitenkin haasteita kuten kallis infrastruktuuri jolla akun vaihtaminen toteutetaan. Myös akkuihin sidottava suuri pääoma on haaste menetelmän yleistymisen kannalta.

6 Simuloitava verkko ja simulointimenetelmät

Sähköautojen verkkovaikutuksia tarkastellaan simuloimalla kuormitusta verkkotietojärjestelmän avulla. Ennen simuloinnin aloittamista on tärkeä määrittellä kaikki tuloksiin vaikuttavat muuttujat ja perustella tehdyt oletukset järkevin perustein. Simulointi suoritetaan Keravan energia Oy:n verkkotiedoilla. Seuraavassa luvussa verkosta tarkastellaan case -esimerkkeinä muutamaa erityyppistä lähtöä, sekä pienjänniteverkosta kahta erilaista muuntopiiriä. Tarkasteltavat muuntopiirit valitaan joukosta sen perusteella, miten hyvin asiakkaiden autokanta ja liikkumistottumukset tunnetaan. Valinnassa huomioidaan lisäksi, että tarkasteluun tulee sekä taajamaverkko, että taajaman ulkopuolinen pienjänniteverkon osa.

Simuloinnissa käytettävän verkon laskentaparametrit on kalibroitava, jotta verkon laskennallinen huippukuormitus saadaan vastaamaan paremmin todellista tilannetta. Näin ollen simuloinnin tuloksia voidaan pitää luotettavina ja perusteltuina sekä mahdollisesti jatkojalostaa lähempää tarkastelua varten. Verkon kalibrointi on esitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa 6.1.

6.1 Simuloitavan verkon kalibrointi

VTJ:n (verkkotietojärjestelmä) verkon kuormitus sovitettiin vastaamaan Keravan Energia Oy:n mittamaa asemakohtaista tuntidataa, joka oli mitattu vuosien 2002–2005 aikana. Mittausten perusteella voidaan todeta asemien huipputehojen olevan taulukon 6.1 mukaiset. Massbyn aseman huipputehossa on huomioitu Ingmanin tehtaan tehohuipun ajoittuminen kesälle, eli data on suodatettu käyttöön vain talven osalta. Laskennan tilastollinen varmuuskerroin on asetettu 5 % ylitystodennäköisyyden mukaan arvoon 1,65 ja huipputehojen suuruus on korjattu vakiokertoimella vastaamaan mitattuja arvoja.

Taulukko 6.1 Sähköasemien mitatut huipputehot vuosien 2002–2005 ajalta sekä laskennalliset huipputehot ja tehojen suhde asemakohtaisesti.

Sähköasema	Mitattu huipputeho [MW]	Laskennallinen huipputeho [MW]	Laskennallinen / mitattu huipputeho %
MASSBY	13,6	10	73,6
MARTINKYLÄ	17,1	18	105,5
KALLBACK	14,4	14,6	101,3
Σ	45,1	42,6	94,5

Taulukosta 6.1 havaitaan, että mitatut ja lasketut tehot vastaavat melko hyvin toisiaan Massbyn asemaa lukuun ottamatta. Ilman tarkempaa alueen kuluttajarakenteen tuntemusta on vaikea kommentoida tarkasti syitä, jotka ovat johtaneet mitatun ja laskennallisen arvion merkittävään poikkeamaan. Simuloinnin kannalta verkko on kuitenkin sähköasematasolla riittävällä tarkkuudella todellisuutta vastaavassa tilassa. Tarkempien analyysien kohteet on kuitenkin syytä valita Martinkylän tai Kallbackan sähköasemien johtolähtöjen joukosta.

6.2 Simulointi

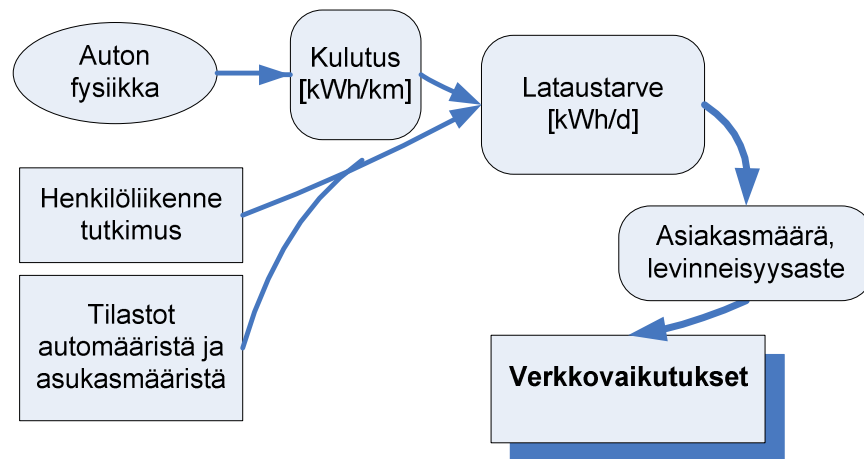
Verkostolaskentaa varten on tehtävä useita parametrivalintoja ja olettamuksia tulevaisuudesta. Suurin epävarmuus liittyy kuormituksen kasvun suuruuteen sekä sähköautojen lataustarpeen ajankohtaan, paikkaan ja määrään. Perinteisessä verkostolaskennassa kuormituksen kasvu on voitu yleensä ennustaa kohtuullisella tarkkuudella asemakaavojen ja väestön kasvuennusteiden mukaan. Laskennalle on kuitenkin syytä luoda uskottavat edellytykset valitsemalla huolellisesti laskentaparametrit ja periaatteet.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään tarkemmin simuloinnin lähtöparametrit ja muutamaa simulointitapaa, joilla kuormituksenkasvu voidaan tarkastella. Kappaleessa ei oteta kantaa kaikkiin mahdollisiin simulointimenetelmiin, mutta simulointitilanteen kannalta mielekkäimmät tarkastellaan.

6.2.1 Simuloinnin parametrit

Huipputehoihin vahvasti vaikuttava parametri on tilastollinen varmuuskerroin, joka ottaa huomioon tilastollisen kuorman ylitystodennäköisyyden. Laskennan tarkoituksena on pyrkiä määrittämään halutulla varmuudella vaikein tilanne, joka voi seurata sähköautojen yleistymisestä. Tyypillisesti johdinten huippukuormituksen mitoituksessa käytetään ylitystodennäköisyyttä 1 % tai 5 % (Lakervi & Partanen 2008). Pienempi 1 % todennäköisyys johtaa varmempaan verkon mitoitukseen eikä verkon vahvistamisen tarve ole kovin suuri käytön aikana. Suurempi 5 % todennäköisyys antaa hieman pienemmän arvion huipputehoista, mutta koska käytettävät hajonnat ovat melko suuria tehoihin nähden, käytetään 5 % ylitystodennäköisyyttä.

Simulointia varten on tehtävä myös joukko oletuksia latauskuormia koskien. Kuvassa 6.1 on esitetty yksinkertainen malli, jonka avulla verkkovaikutusten analysointiin päästään. Henkilöliikennetutkimus on hyvin merkittävä lähtötieto prosessin taustalla.



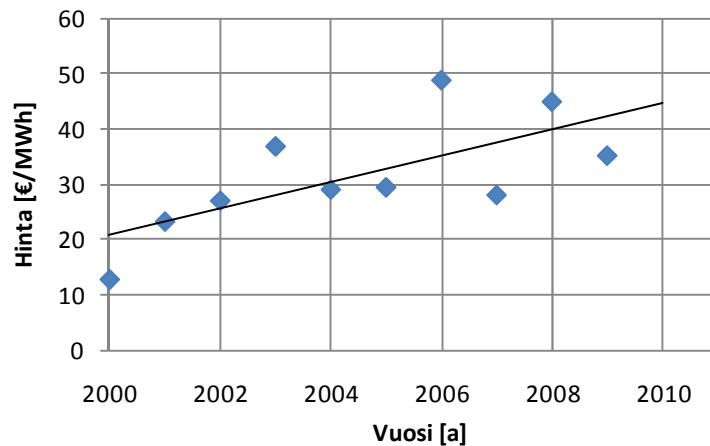
Kuva 6.1 Sähköauton lataustarpeen määrittämisen vaiheet.

Tyypillisen sähköauton kuluttama energia on noin 0,2 kWh/km. Optimistisimmat arviot energiankulutuksesta ovat luokkaa 0,125 kWh/km (Ipakchi et al. 2009). Kappaleessa 4.1 esitetyn keskimääräisen auton ajomäärän perustella voidaan arvioida keskimääräinen päivittäinen lataustarve yhtä autoa kohden. Auton ajomatkaa kohden kuluttamalle energialle käytetään arvoa 0,2 kWh/km. Akkujen latauksen häviöiden, akkujen ylläpidon ja auton sisätilan vuoksi lisätään päivittäiseen energiantarpeeseen 2 kWh/d. Tarkastelu keskittyy talviaikaan, joten lämmitystarpeen huomiointi on perusteltua. Päivittäiseksi latausmääräksi saadaan 13 kWh/d. Häviöt ovat nykyaikaisilla akuilla ja tehoelektroniikalla melko pieniä. Häviöt ovat kuitenkin riippuvaisia lataustehon suuruudesta.

Simuloinnin yhteydessä tehdään myös joukko muita olettamuksia:

- Simuloinnissa huomioidaan ainoastaan henkilöautokanta ja auton akkukapasiteetti on aina riittävä
- Sähköautojen oletetaan liikkuvan pelkällä sähköllä
- Latauksen hajautumista työssäkäynnin perusteella ei huomioida
→ Autojen lataus ainoastaan tapahtuu kotitalouksissa
- Laskennassa oletetaan, että autoja on 100 % levinneisyydellä jokaisessa kotitaloudessa keskimäärin yksi kappale
- Laskennassa käytetyn verkon nykyinen kuormitus on säädetty vakio-kerrointa käyttämällä sähköasemamittauksia vastaavalle tasolle
- Lataus on kolmivaiheista (10 kW/auto)

Häviöenergian hinta vaikuttaa verkon häviökustannuksiin, joten on perusteltua määrittää häviöiden hinta huolellisesti tulevaisuutta ajatellen. Nord Pool Spot tilastojen mukaan spot -sähkön keskihinta on ollut vuosien 2000–2009 välillä 31,4 €/MWh. (Nord Pool 2010) Keskihinta on kuitenkin liian optimistinen arvio, koska verkon tilaa on tarkoitus tarkastella tulevaisuutta silmälläpitäen. Hinta voidaan määrittää esimerkiksi vuosien 2000–2009 keskihintojen perusteella pns -sovitteella ja interpoloimalla seuraavalle vuodelle 2010 tai jopa pidemmälle. Sähkön hinnan kehitystä voidaan tarkastella myös sähköpörssin markkinatuotteita tarkastelemalla. Tuotteiden hintakehityksen pohjalta voidaan tehdä päätelmiä markkinoiden sähkönhinnan kehitysodotuksista. Forwardien hinnat tuleville vuosille osoittavat hinnan olevan nousemassa. Vuoden 2011 forwardin ostohinta 25.10.2010 oli 45 €/kWh (Nord Pool 2010). Valitaan tarkasteluun häviöenergian hinnaksi kuvaajan 6.2 ja forwardin hinnan perusteella 45 €/MWh.



Kuva 6.2 Spot -keskihinta vuosilta 2000–2009 sekä lineaarinen sovite interpoloituina vuodelle 2010. (Nord Pool 2010)

Häviötehon kustannus voidaan laskea, kun tunnetaan verkon häviöiden huipunkäyttöaika. Keski-jänniteverkon häviöiden huipunkäyttöajaksi voidaan valita esimerkiksi verkostolaskennassa yleisesti käytetty 1700 h, näin ollen häviöenergian kustannuksen perustella häviötehon kustannukseksi saadaan 76 €/kW,a. Taulukossa 6.2 on esitetty yhteenveto laskennan parametreista.

Taulukko 6.2. Taulukossa on esitetty teknistaloudellisen laskennan ja kuormitussimuloinnin parametrit koostettuna.

parametri	arvo
Häviöenergian hinta	45 €/MWh
Tehohäviön hinta	76 €/kW,a
Häviöiden huipunkäyttöaika	1700 h
Korkokanta	5 %
Tilastollinen varmuuskerroin	1,65

6.2.2 Kuormituksen kasvun simulointimenetelmät

Kuormituksen kasvun simulointiin on monta menetelmää. Kasvua voidaan simuloida olettamuksella, että kuorman kasvu on tasaista eli kuormitus kasvaa samassa suhteessa vuorokauden jokaisella tunnilla. Simulointimenetelmä voisi olla sopiva, jos sähköautojen lataus tapahtuisi hyvin hitaasti ja latausaikojen hajonta

olisi suurta. Simuloinnin ominaisuuksia ja esimerkitapaus on käsitelty tarkemmin luvussa seitsemän.

Simulointi voidaan toteuttaa myös muokkaamalla kuormitusmalleja ja asiakas-kohtaisia päiväenergioita. Näin ollen kuormituksen luonne voidaan ottaa huomioon simuloinnissa, kun tunnetaan lisättävän kuorman suuruus tietyllä ajanhetkellä ja kuorman päiväenergian summa. Menetelmä sisältää pienen virheen, jos asiakkaiden kuormat ovat paljon keskimääräisestä poikkeavia. Asiakaskohtainen tyyppikäyrien muuttaminen tuottaisi tarkemman tuloksen ilman virhettä, mutta koska kyseessä on suuren joukon simulointi, joka sisältää niin pienen kuin suuren päiväenergian asiakkaita, voidaan virheen olettaa jäävän pieneksi. Simulointi ja simuloinnin mahdollinen virheiden muodostuminen on esitelty tarkemmin kappaleessa 7.1.4.

Kolmantena vaihtoehtona simuloida sähköautojen aiheuttamaa kuormitusta on asettaa jokaista asiakasta kohden uusi kuormituspiste samaan solmupisteeseen asiakkaan kanssa. Menetelmän etuna on tarkkuus ja edellä esitetyn menetelmän mukana tuoman virhetekijän poistuminen. Jokaisella asiakkaalla olisi tällä menetelmällä juurikin asetetun kaltainen sähköauton latauksen tyyppikäyrä ja latauksen päiväenergia. Kuormituskäyrän suhteellinen muoto ei kärsisi lainkaan asiakkaiden päiväenergioiden eri suuruudesta. Menetelmän toteuttaminen käytännössä VTJ:llä on kuitenkin haasteellista, koska sähköautojen latauskuorman lisäämistä jokaiselle noin 7000 asiakkaalle ei pystytä aikataulun puitteissa toteuttamaan. Näin ollen menetelmällä ei toteuteta simulointeja.

Yhtenä vaihtoehtona on käyttää simuloinnin pohjalla todellista tuntidataa, jota on mitattu asiakkailta. Näin ollen voidaan luoda todellisuutta vastaava tilanne muuntopiirin tasolla, jossa ainoaksi epävarmuustekijäksi jää latauskuorma. Latauskuorman huolellisella arvioinnilla voidaan kuitenkin saada tuloksia, joiden avulla voidaan ottaa kantaa verkon kehittämiseen tulevaisuudessa. Simulointi on käsitelty tarkemmin kappaleessa 7.2.3.

6.3 Johdinten teknistaloudellinen tarkastelu

Keskijänniteverkon kaapelien poikkipinta on verkostolaskennan periaatteiden mukaan oltava teknistaloudellisesti kannattavaa. Lisäksi johtimen kuormituksen kestoisuus ei saa ylittyä, eikä jännitteenalenema saa kasvaa kohtuuttoman suureksi. Johtimen kannattava teknistaloudellinen korvaaminen voidaan laskea, kun tunnetaan johtimen vaihtokustannukset ja häviöiden hinta.

6.3.1 Johdinvaihdon taloudellisen rajatehon laskenta

Johtimen vaihto on kannattavaa häviöiden takia, kun seuraava epäyhtälö toteutuu (Lakervi & Partanen 2008)

$$K_{h1} - K_{h2} > \varepsilon K_{vah}, \quad (6.1)$$

jossa

- K_{h1} = nykyisen johdon seuraavan vuoden häviökustannukset
- K_{h2} = suuremman johtimen seuraavan vuoden häviökustannukset
- K_{vah} = johdinvaihdon kustannukset
- ε = annuiteettikerroin.

Annuiteettikerroin voidaan laskea seuraavasti

$$\varepsilon = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (6.2)$$

jossa p on vuotuinen korkoprosentti ja n on johtimien pitoaika, joka on tässä tapauksessa oletettu olevan 45 a. Häviöiden hinnan muodostuminen uudelle ja vanhalle johtimelle voidaan esittää yhtälöllä seuraavasti

$$K_0 = H_p \frac{P_0^2}{U^2 \cos \varphi} R_j, \quad (6.3)$$

jossa

H_p = häviöiden hinta

R_j = johdon resistanssi

$\cos\varphi$ = tehokerroin

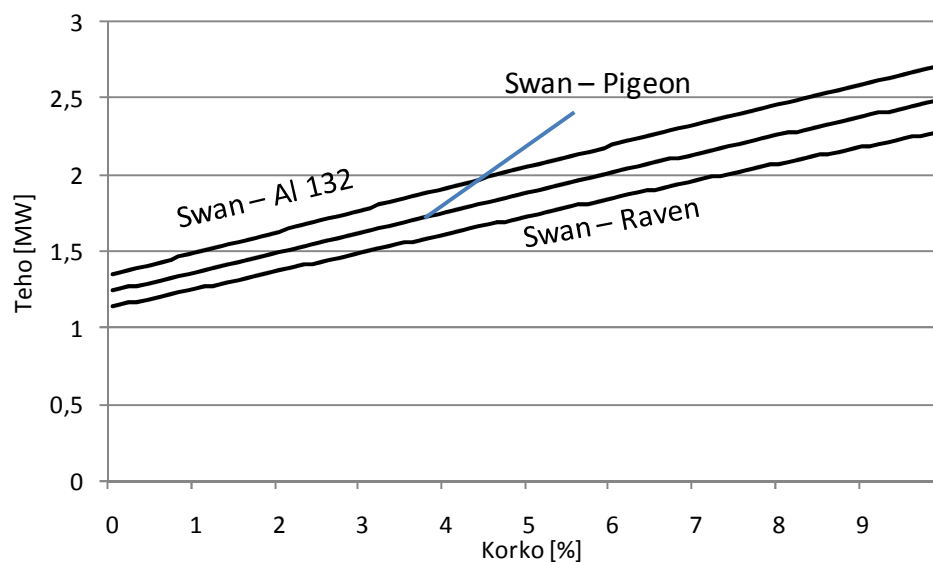
P_0 = johdon teho alkuhetkellä

U = pääjännite.

Edellisistä yhtälöistä (6.1) ja (6.3) voidaan johtaa yhtälö johtimen kannattavan vaihdon tehorajalle seuraavasti

$$P_0 > U \cos\varphi \sqrt{\frac{\varepsilon k_{\text{vah}}}{H_p (R_1 - R_2)}} \quad (6.4)$$

Kuvassa 6.3 on laskettu esimerkiksi muutaman eri poikki-pinta-alaisen johtimen vaihdon taloudellinen rajateho. Rajatehot ovat verkon suunnittelun kannalta oivallinen apuväline, koska verkkotietojärjestelmän laskentalistauksista nähdään erittäin helposti kunkin johto-osuuden huippukuormitus.



Kuva 6.3 Taloudellinen rajateho johdinvaihdolle koron funktiona. Johdinvaihdon kannattavuuden laskenta on tehty ainoastaan muutamilla johdintyypeillä.

Myös rajatehon laskennassa, kuten muussakin verkostolaskennassa lähtöarvojen valinta näyttelee suurta roolia. Ilman kunnollisia lähtöarvoja ja laskentaparametreja laskennan tulosten perustella ei voida tehdä verkon kehittämistä koskevia päätöksiä. Laskennassa käytettiin kappaleessa 6.2.1 esitettyjä ja perusteltuja parametreja sekä lisäksi johtimien pitoajalle valittiin 45 a ja tehokertoimelle $\cos\varphi = 0,96$, joka on tyypillinen keskijänniteverkon tehokerroin. Taulukossa 6.3 on esitetty uuden johtimen rakennus kustannukset ja johdinvaihdon taloudellisia rajatehoja eri korkokannoilla. Johdinvaihdon kustannukset perustustuvat kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin (Lakervi & Partanen 2008). Lisäksi johdinvaihdon kustannus Pigeon -johtimeen on laskettu keskiarvona ohuemman ja paksumman poikkipinta-alan vaihtokustannuksista.

Taulukko 6.3 Eräiden johtimen vaihtokustannukset resistanssit ja johdinvaihdon taloudelliset rajatehot eri tapauksissa.

Alkuperäinen johdin	Uusi johdin	Vaihtokustannus [€/km]	Resistanssi [Ω]	Johdinvaihdon taloudellinen rajateho korkoprosentilla [MW]				
				2 %	4 %	5 %	6 %	8 %
Swan			1,360					
	Sparrow	6100		1,49	1,75	1,88	2,01	2,26
	Raven	8200		1,36	1,60	1,72	1,84	2,06
	Pigeon	12100		1,48	1,75	1,87	2,00	2,25
	AI 132	16000		1,62	1,90	2,04	2,18	2,45
Sparrow			0,848					
	Raven	8200		2,21	2,60	2,79	2,98	3,35
	Pigeon	10100		1,92	2,26	2,42	2,59	2,91
	AI 132	12000		1,89	2,22	2,38	2,54	2,86
Raven			0,536					
	Pigeon	8200	0,337	2,77	3,26	3,50	3,74	4,20
	AI 132	10000	0,219	2,42	2,85	3,06	3,27	3,67

6.3.2 Uuden johdon mitoitus

Uuden johtimen mitoitus on tehtävä taloudellisten ja teknisten reunaehtojen ohjeistamana. Johtimen taloudellinen poikkipinta voidaan määrittää seuraavaan yhtälöön pohjautuen (Lakervi & Partanen 2008)

$$K_{h1} - K_{h2} > K_v, \quad (6.5)$$

jossa

- K_{h1} = johtimen 1 käyttöiän aikainen häviökustannus
- K_{h2} = johtimen 2 käyttöiän aikainen häviökustannus
- K_v = johtimien rakennuskustannuksien erotus.

Johtimien käyttöiän aikaiset kustannukset voidaan laskea kertomalla ensimmäisen vuoden häviökustannukset kapitalisointikertoimella κ . Kapitalisointikerroin voidaan esittää

$$\kappa = \psi \frac{\psi^n - 1}{\psi - 1}, \quad (6.6)$$

jossa n on johtimen pitoaika ja ψ on

$$\psi = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}}, \quad (6.7)$$

jossa r on vuotuisen tehonkasvun prosentti ja p on korkokanta. Yhtälöistä (6.3) ja (6.5) voidaan johtaa taloudellisen johtimen poikkipinta-alan valinnalle yhtälö

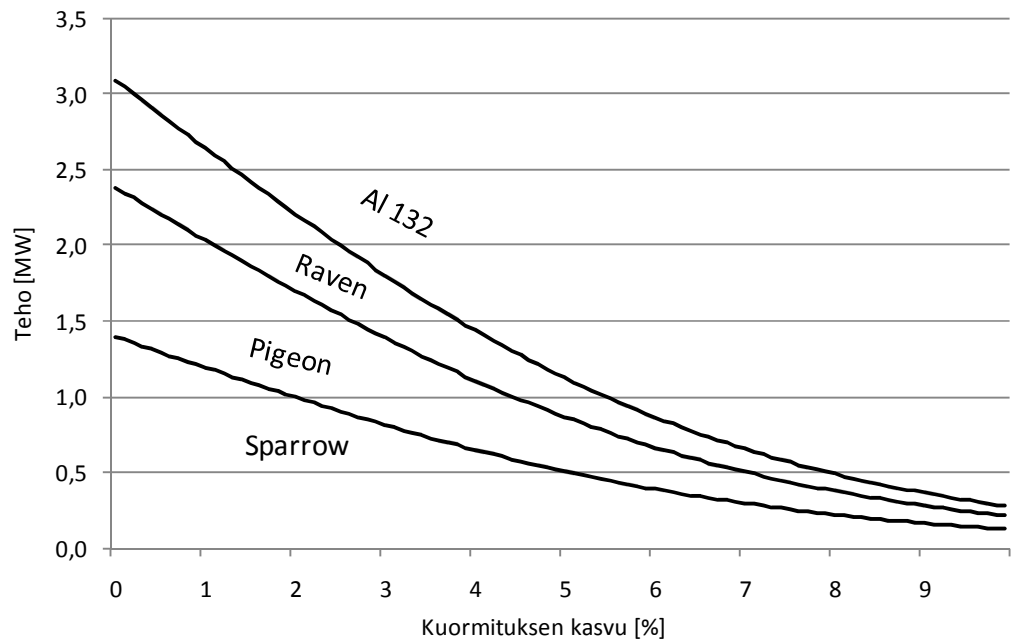
$$P_0 > U \cos \varphi \sqrt{\frac{K_v}{\kappa H_p (R_1 - R_2)}}. \quad (6.8)$$

Kuvassa 6.4 on laskettu muutamien johdinten taloudellinen rajateho kuormituksen kasvun funktiona yhtälöä (6.8) käyttäen. Johdinten rakennuskustannuksina on käytetty Energiamarkkinaviraston suosituksia ja johdinten resistanssien arvoina erään johdinvalmistajan ilmoittamia arvoja (EMV 2010,a; Draka 2010).

Taulukossa 6.4 on laskennassa esitetty laskennassa käytetyt johdinten resistanssit ja rakennuskustannukset. Häviökustannuksena on käytetty 76 €/kW.

Taulukko 6.4 Muutaman erilaisen johdintyyppin rakennuskustannukset ja resistanssit. (EMV 2010,a; Draka 2010)

Johdintyyppi	Kustannus [€/km]	Resistanssi [Ω /km]
Sparrow	17 720	0,848
Raven	21 740	0,536
Pigeon	24 850	0,337
Al 132	28 780	0,219



Kuva 6.4 Taloudellinen rajateho uuden ilmajohtimen rakentamiselle kuormituksen kasvun funktiona. Johtimilla on 40 vuoden pitoaika, korkokanta 5 % ja häviöiden hinta 76 €/kW.

Kuvasta voidaan havaita, että johtimien taloudellinen rajateho on hyvin pieni, jos kuormituksen kasvun ennuste on hyvin suuri. Esimerkiksi 5 % vuotuinen kuormituksen kasvu tarkoittaa kuormituksen kasvun kaksinkertaistumista 15 a aikana.

7 Sähköautojen latauskuorman verkkovaikutusten simulointi

Sähköautojen verkkovaikutusten arviointi perustuu kuormitusmalleihin ja simulointeihin. Kuormitusmallit ovat avainasemassa verkkoon syntyvien tehojen suuruuden ja ajallisen vaihtelun määrittämisessä. Verkon lopullisen saneeraustarpeen määrittämiseksi on tunnettava hyvin nykyisen verkkorakenteen tila ja mahdolliset pullonkaulat.

Tässä luvussa käsitellään keski- ja pienjänniteverkon nykytilaa ja simuloinnin tuloksia ja mahdollista saneeraustarvetta. Verkon nykytilan selvittäminen antaa myös pohjan arvioille, paljonko verkkoon voidaan lisätä kuormitusta ennen kuin saneeraustoimenpiteisiin on ryhdyttävä.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään keski- ja pienjänniteverkon simulointia tarkemmin. Keskijänniteverkon simulointitulosten käsittely on hyvin pintapuolista. Päähuomio on muuntajien kapasiteettien riittävyyden tarkastelussa. Tarpeen vaatiessa tarkastellaan myös johdinten poikkipinta-alojen korvaustarvetta. Verkkokokonaisuudesta ei tehdä teknillistaloudellisia laskemia vaan pienjänniteverkko-verkoissa tarkastellaan lähinnä jännitteenalenemaa ja sen seurauksen mahdollisesti aiheutuvia toimenpiteitä.

7.1 Keskijänniteverkkoverkko

Sähköautotarkastelut tehdään Keravan Energia Oy:n jakeluverkkotietoja hyödyntäen. Verkon alueella on kolme sähköasemaa, joiden yhteenlaskettu huipputeho on 42 MW. Verkko on rakenteeltaan pääosin maaseutuverkkoa, jonka kuormitus on maaseutuverkoksi melko korkea suurista teollisuustoimijoista johtuen.

7.1.1 Nykytilanne

Verkon sähkötekniistä nykytilaa voidaan tarkastella verkkotietojärjestelmän tehonjakolaskelmien avulla. Johtolähdöt ovat kuormittuneet hyvin epätasaisesti pienimpien tehojen ollessa alle 1 MW luokkaa ja suuritehoisimpien ollessa yli 7 MW. Suurimmat jännitteenalenemat ovat pitkillä ja korkeasti kuormitetuilla

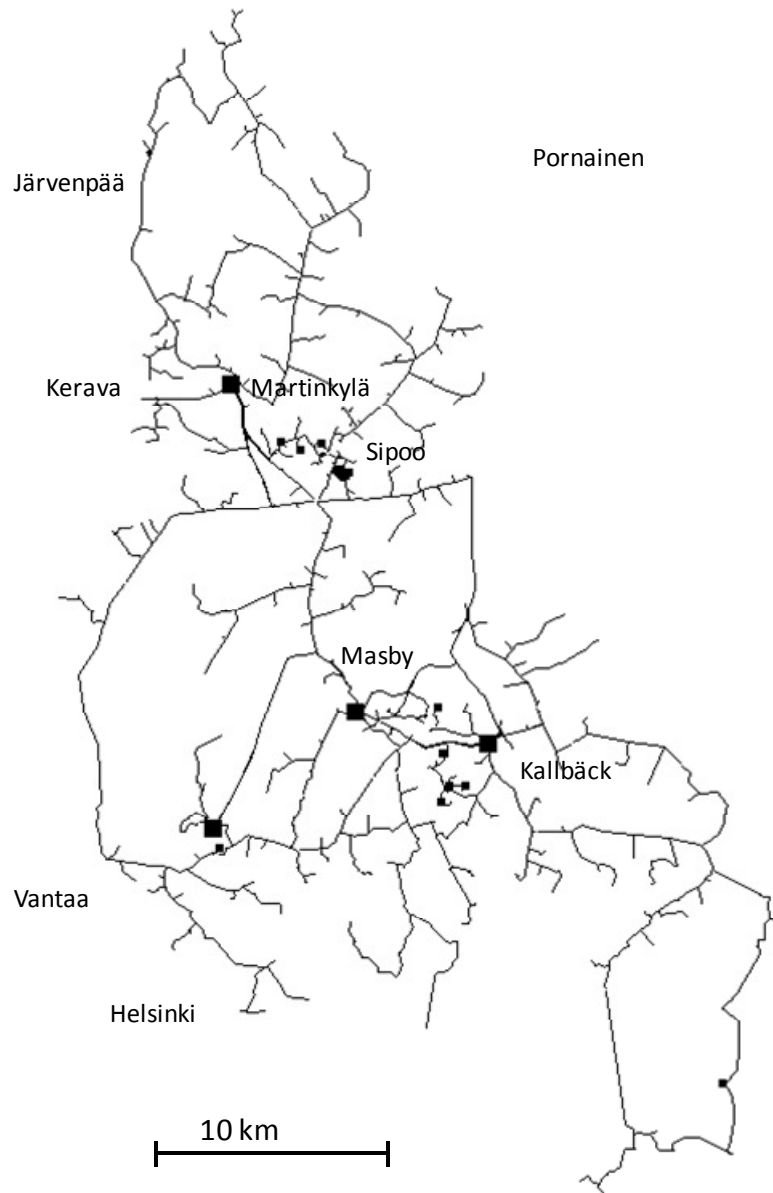
lähdoillä tällä hetkellä 3–4 % suuruusluokkaa. Sähköautojen latauskuorman vaikutusten arviointi on erityisesti painotettava lähdoille, joiden kuormitus on en-tuudestaan suurta ja jäljellä olevaa kapasiteettia on vähän. Taulukossa 7.1 olevi-en tietojen pohjalta voidaan todeta, että lähtöjen jäljellä oleva kapasiteetti vaihte-lee paljon eri lähtöjen välillä. Verkossa on muutama lähtö, jotka eivät kestä pal-joakaan lisäkuormaa. Toisessa ääripäässä on muutamia lähtöjä, joiden kuorma voidaan kasvattaa 10 -kertaiseksi.

Taulukko 7.1 Tarkasteltavan verkon tunnuslukuja lähdoittäin.

	Laskennallinen huipputeho	Suurin jännitteen alenema	Häviöteho ja häviöenergia		Häviö- kustannus	Jäljellä oleva kapasiteetti <small>U_{hmax} > 5% tai I_L > I_{hmax}</small>
	[MW]	[%]	[kW]	[MWh/a]	[k€]	[MW]
Kallbäck						
Ingman	5,1	2,4	83,0	145,1	37,2	2,7
Kalkstrand	2,6	1,2	18,7	33,8	8,5	3,3
Söderkulla	1,1	0,2	1,3	1,1	0,8	10,0
Gumbostrand	1,6	1,4	10,8	19,3	4,9	1,8
Box	1,3	0,6	4,4	9,2	2,2	4,9
Galthagen	0,6	0,1	0,3	0,8	0,2	12,0
Spjutsund	2,0	3,1	33,5	46,2	13,4	0,5
Massby						
Nikkilä	1,6	1,3	14,9	27,8	6,9	2,8
Immersby	4,0	3,4	76,9	165,8	38,5	0,7
Söderkulla	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0
Ingman 1 ja 2	4,1	0,9	3,0	10,8	2,1	5,0
Martinkylä						
Nikkilä	7,1	3,8	182,7	468,0	101,0	1,7
Paippinen	2,8	2,5	38,1	80,6	18,8	1,5
Porvoo	2,3	1,6	21,6	42,6	10,3	1,7
Saxas	3,1	3,2	39,5	114,7	23,6	0,6
Hindsby	1,6	1,6	14,8	25,7	6,6	2,4
Talma	0,8	0,3	1,3	2,5	0,6	4,5
Σ						66

Tehonjakolaskelma osoittaa, että verkossa syntyy häviöitä yhteensä 0,55 MW, ja häviöiden huipunkäyttöaika vaihtelee välillä 1370–3050 h johtolähdoistä riippu-en. Keski-jännitejohtojen vuotuinen häviöenergia on 1,2 GWh, häviökustannusten ollessa yhteensä 275 k€/a.

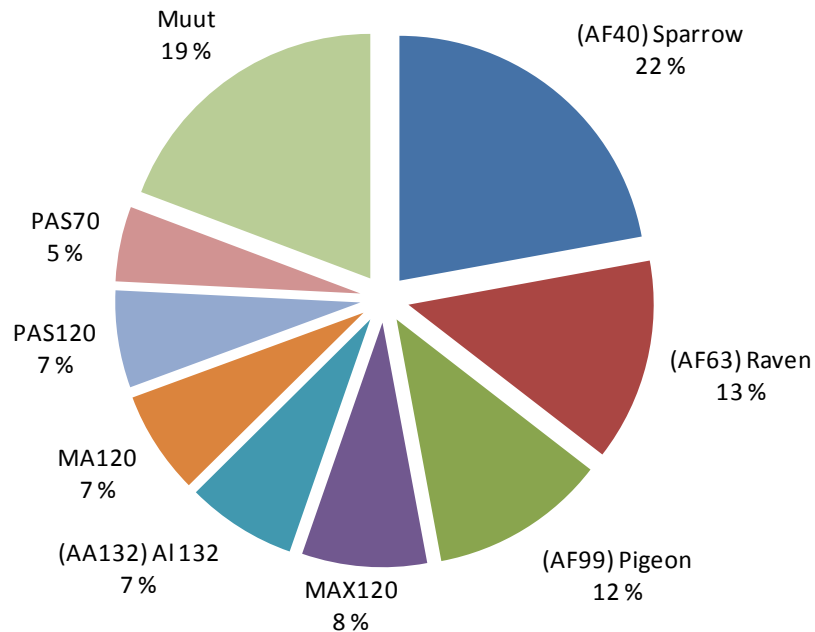
Tarkasteltava verkko on tyypillinen maaseutuverkko, jossa on suurehko taajama-alue. Kuvassa 7.1 on tarkasteltavan verkon verkkokuva keskijännitejohtojen osalta. Kuvasta voidaan havaita, että verkko on puurakenteinen mutta silmukkarakenteitakin esiintyy. Verkkoa käytetään kuitenkin kokonaan säteittäisenä. Etelä-pohjois-suunnassa verkko on noin 50 km alueella.



Kuva 7.1 Keravan Energia Oy:n verkkokuva.

Verkossa on yhteensä 596 km keskijännitejohtoja. Eri johdintyyppien osuudet on esitetty kuvassa 7.2. Tehon ja häviöiden kasvun näkökulmasta johtimien sanee-

raustarvetta voidaan arvioida teknistaloudellisen laskennan keinoin. Johtimen vaihdon taloudellinen rajateho kertoo rajatehon, jolloin johdinvaihto on kannattavaa. Johdinosuuksien kuormitustiedot voidaan lukea verkkotietokannan johtolähtökohtaisista listauksista. Edellisten summana voidaan tehdä päätös, paljonko mitäkin johdintyyppiä on järkevää vaihtaa uuteen paksumman johtimeen.



Kuva 7.2 Keskijänniteverkon johdinten osuudet 596 km kokonaisjohtomäärästä.

7.1.2 Verkon saneeraustarve nykytilanteessa

Jakelumuuntajien kuormitukseen perustuvan tarkastelun perusteella verkko vaikuttaa vaativan saneerausta, koska verkon kuormitus on mitoitukseen nähden paikoin melko suurta. Keskijänniteverkossa ei esiinny ylikuormaa normaalitilanteessa. Taulukossa 7.1 on esitetty keskijänniteverkon jäljellä oleva kapasiteetti lähdeittäin. Tarkastelu osoittaa, että eniten kuormitetuilla lähdeilläkin kuormaa voidaan kasvattaa noin 20 % ja vähemmin kuormitetuilla lähdeillä kuormaa voidaan jopa moninkertaistaa. Kuormitettavuuden rajana on käytetty 5 % jännitteenalenemaa tai johtimen suurinta sallittua kuormitettavuutta. Tästä näkökulmasta keskijänniteverkon siirtokapasiteettia on jäljellä sähköautojen latausta ajatellen runsaasti joitakin lähtöjä lukuun ottamatta.

Jakelumuuntajien kannalta saneeraus vaikuttaa tarpeelliselta, koska osa muuntajista käy ylikuormassa. Lisäksi verkko on alueella, jossa väestönmäärä on kasvava, joten verkon kuormitus tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa ilman sähköautojen latauskuormaakin. Verkon kuormitusta voidaan tarkastella VTJ:n muuntajalaskentatietojen perusteella. Muuntajien kuormitustietojen pohjalta voidaan päätellä, paljonko verkkoon voidaan lisätä kuormaa kullakin lähdöllä. Koska verkon kuormitusta ollaan kasvattamassa, voidaan mahdollisen lisäkuormituksen määrä laskea seuraavasti kun tunnetaan muuntajien koko ja kuormitus lähdöllä

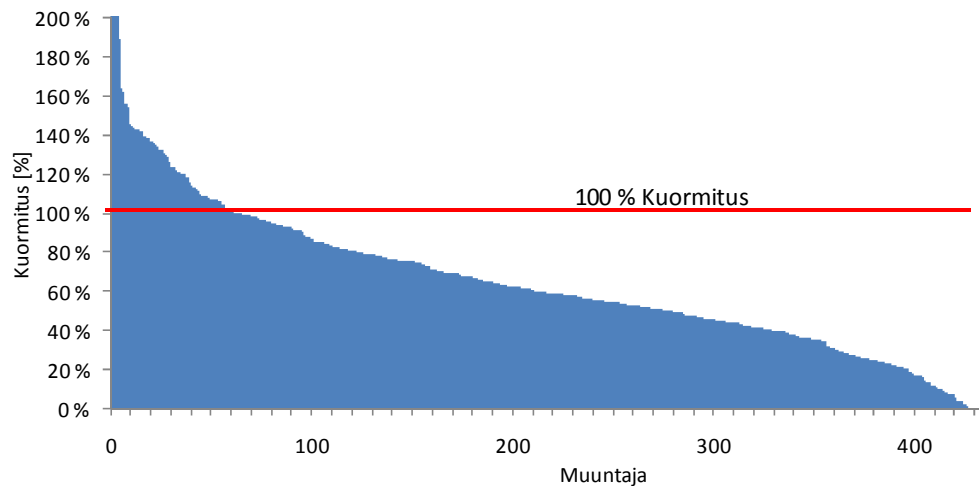
$$P_{\text{lisäys}} = \sum P_{\text{max}} - P_{\text{N}}, \quad (7.1)$$

jossa $P_{\text{lisäys}}$ on verkkoon lisättävän tehon kokonaissumma, P_{max} on muuntajan huipputeho ja P_{N} on nimellisteho.

Sähköautojen lataus aiheuttaa erityisen suuria paineita verkon saneeraukselle, koska sähköautojen lataus ajoittuu osittain huippukuormituksen kohdalle (Rautainen et al. 2010). Jo ennestään runsaasti kuormitettu verkko joutuu hyvin suuren kuormituksen lisäyksen vuoksi tilaan, joka ei todennäköisesti ole suotuista sähkötekniisessä eikä taloudellisessa mielessä.

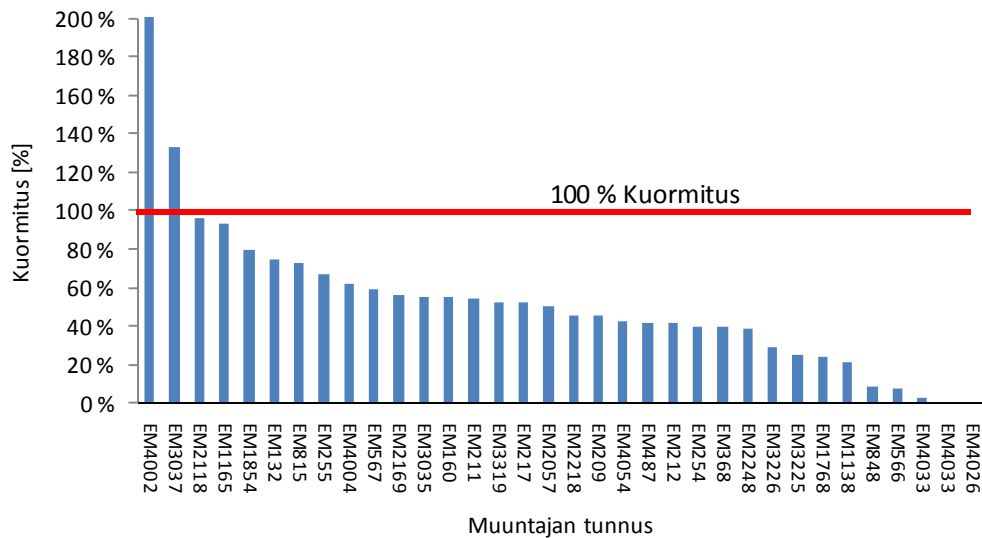
Tehtyjen tarkastelujen pohjalta voidaan todeta, että merkittävä osa verkon muuntajista joutuu huippukuorman aikana ylikuormaan. Kuvassa 7.3 on esitetty kaikkien verkon 20/0,4 kV muuntajien kuormittuminen. Voidaan todeta, että 14 % verkon jakelumuuntajista käy ylikuormassa huippukuorman aikana. Tulos perustuu kuitenkin laskentaan ja on riippuvainen käytetyistä parametreista. Esimerkiksi tilastollinen varmuuskerroin vaikuttaa laskennan tuloksiin merkittävästi. Ylitystodennäköisyyden 1 % käyttö 5 % sijasta tarkoittasi, että laskenta osoittaisi muuntajista 20 % käyvän ylikuormassa huippukuorman aikaan. Tulosten todentodennäköisyyttä voidaan arvioida muuntamokohtaisten huippukuormamittausten ja

yhä yleistyvän asiakaskohtaisen AMR -mittausten perusteella. Tämän kyseisen tutkimuksen puitteissa kyseistä dataa ei ollut käytettävissä.



Kuva 7.3 Tarkasteltavan verkon 20/0.4 kV muuntajien kuormitus huippukuorman aikaan.

Kuvassa 7.4 on nähtävissä muuntajien kuormitus Martinkylän 110/20 kV sähköaseman Nikkilän johtolähdöllä. Laskennan mukaan kaksi muuntamoaa käy ylikuormalla huippukuorman aikana. Johtolähdön huipputeho on noin 7,3 MW ja lähdön muuntajien kokonaiskapasiteetti on 15 MVA. Näin kuormaa voidaan teoriassa kasvattaa noin 7 MW, jos kuormitus jakautuisi optimaalisesti muuntajien kesken suosien pienemmällä kuormalla käyviä muuntajia. Todellisuudessa kuormituksen lisääntymiseen vaikuttaa mm. asutuksen ja väestömäärän muutokset sekä sähköautojen latauksen yhteydessä asuntojen tyyppien jakautuminen muuntopiirien kesken. Lisäksi keskijännitelähdön siirtokapasiteetti asettaa rajat kuormituksen kasvulle. Tyypillisesti käytetyistä johdinten poikkipinta-aloista ja siirtomatkoista johtuen, maksimisiirtoteho keskijännitejohtolähdöllä on noin 8–10 MW.



Kuva 7.4 Martinkylän 110/20 kV sähköaseman Nikkilän 20 kV lähdön muuntajien suhteellinen kuormitus huippukuormituksen aikana. Kuvaajassa on rajana 200 % havainnollisuuden vuoksi.

Muuntajan lisäksi myös osa verkon johtimista on lähellä nimellisen kuormituksen rajaa. Kuormituksen kasvaessa johtimien teknistaloudellinen kannattavuus on kyseenalainen suurten häviöiden vuoksi. Kappaleessa 6.3 on esitetty johtimien taloudellisten kuormitusrajojen laskenta ja esimerkit johdinvaihdon kannattavuudesta samoilla laskentaparametreilla kuin simulointien yhteydessä. Tehonjakolaskelmasta ilmenee, että johtimien kuormitus on vielä siedettävällä tasolla eikä verkon alueella synny suuria jännitteenalennuksia. Suurin jännitteenalennus on 3,8 %. Lähdön häviöteho on 183 kW, häviöenergia 469 MWh/a ja häviökustannukset 57 k€/a. Suurimmat jännitteenalennukset tapahtuvat lähellä lähdön alkua olevassa johdinosuudessa, joten johtimen vaihdon kannattavuutta olisi syytä tarkastella jo ennen sähköautojen latauksen kuormituksen lisäämistä. Kappaleessa 6.3 laskettujen johdinvaihdon rajatehojen perusteella verkossa on useita lyhyitä johdinosuuksia, joissa johdinvaihto olisi kannattavaa.

7.1.3 Kuormituksen kasvun simulointi vakiokerroinmenetelmällä

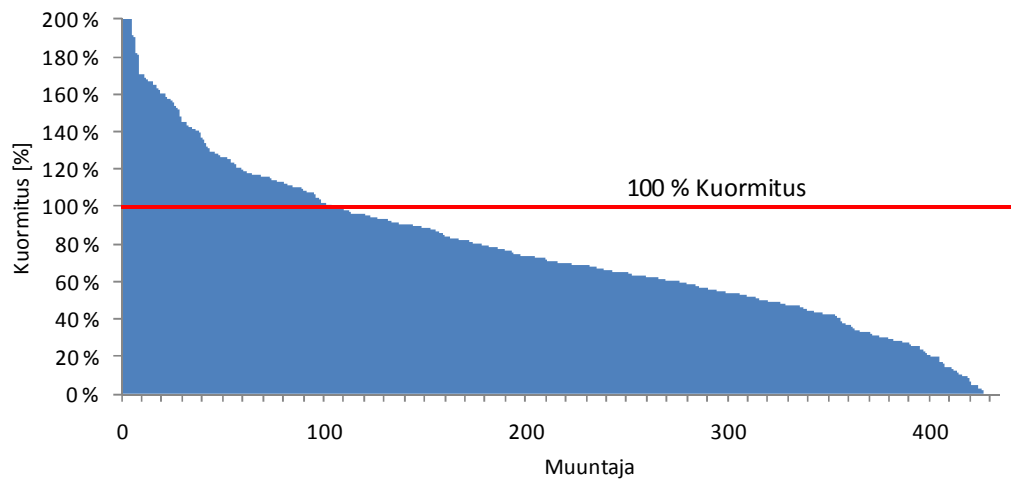
Eräs menetelmä kuormituksen kasvun simulointiin on kuormituksen vakiokerroimen muuttaminen. Verkon kapasiteettirajoitteita voidaan tarkastella lisäämällä kuormitusta tasaisesti vakiokerroimen avulla. Menetelmä ei kuitenkaan ole säh-

köautojen pikalatauskuormaa silmälläpitäen kovinkaan hyvä. Kuorma lisääntyy tasaisesti peruskuorman ja huippukuorman päälle latauskuorman ajankohtaa huomioimatta. Tarkastelu antaa kuitenkin käsityksen siitä, miten suurta energiamäärää verkkoon ollaan lisäämässä. Sähköautojen latauskuorma voi ajoittua pääasiassa illalle korkean peruskuormituksen kanssa samaan aikaan. Menetelmän heikkous on kuormituksen ajankohdan huomiotta jättäminen.

Kokonaiskuormankasvu voidaan arvioida, kun tunnetaan henkilöautokannan määrä, asukasluku, kotitalouksien määrä sekä tutkittavan verkon alueella olevien verkkoon kytkettyjen kotitalouksien määrä. Voidaan tehdä olettamus, että edellä mainittujen arvojen perusteella laskettu keskimääräinen autojen määrä taloutta kohden on riittävän tarkka kokonaiskuormituksen mallintamiseen. Suomessa oli vuonna 2004 4,87 milj. (Henkilöliikennetutkimus 2006) yli kuusi -vuotta täyttänyt asukasta ja noin 2,4 milj. (Tilastokeskus 2010,b) kotitaloutta. Henkilöautokanta oli vastaavana vuonna noin 2,4 milj. autoa (Tilastokeskus 2010,a). Tilastot ovat vuodelta 2004, koska henkilöliikennetutkimuksen aineisto on kerätty kyseisenä ajankohtana. Käyttämällä saman vuoden aineistoja saadaan tarkempi arvio yhden kotitalouden keskimääräisestä automäärästä. Edellisten lukujen perusteella voidaan laskea, että yhdessä kotitaloudessa on keskimäärin yksi auto ja asukaslukuun suhteutettuna yhdellä autolla on noin 2,1 käyttäjää kuten on asukkaita yhtä kotitaloutta kohden. Yksittäinen ihminen liikkuu keskimäärin 32 km/d ja auton kuljettajana toimiva henkilö 25,4 km/d (Henkilöliikennetutkimus 2006), joten autoa kohden päivittäinen ajomatka on keskimäärin 52 km/d. Näiden arvojen perusteella voidaan arvioida päivittäisen energiatarpeen olevan noin 13 kWh ja edelleen koko tarkasteltavan verkon asiakasmäärällä 100 % levinneisyysasteella noin 9,2 MWh/d asiakasmäärän ollessa noin 7150. Auton akkujen latauksen häviöiden ja auton lämpötilan ylläpidon vuoksi päivittäistä energiankulutusta on lisätty 2 kWh/d.

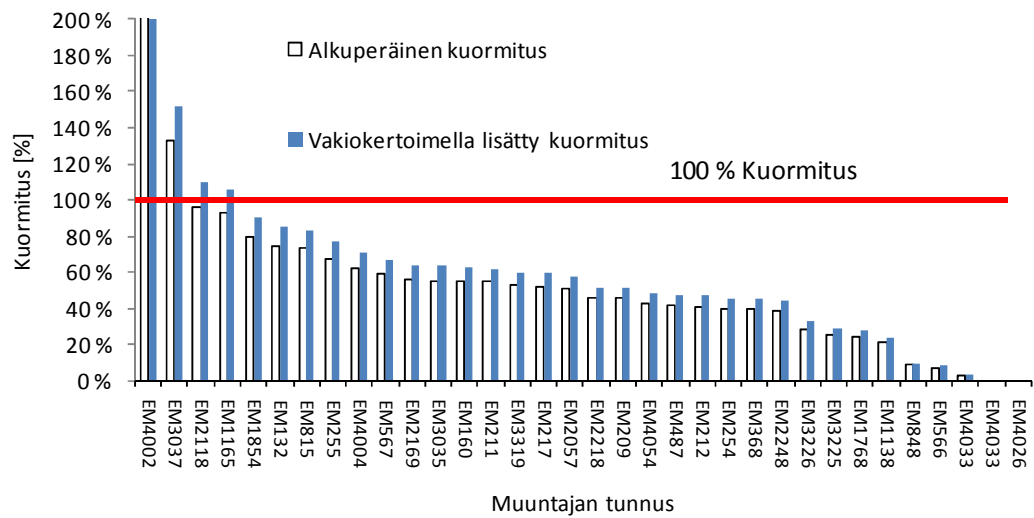
VTJ:llä simulointia varten on aluksi selvitettävä koko verkon vuotuinen energiamäärä, jotta energiamäärää voidaan lisätä autojen latauskuorman verran vakiokertoimella. Energian määrä voidaan laskea esimerkiksi VTJ:n keskijänni-

teyhteenvedosta, jolloin vuosienergiaksi saadaan 178 GWh/a. Alueella olevien sähköautojen määrän arvioidaan olevan 7150 kpl ja sähköntarpeen 34 GWh/a. 100 % levinneisyysasteella sähkönkäyttö olisi peruskuormitus huomioiden 212 GWh/a. Sähköautojen latauskuorma voidaan lisätä verkkoon asettamalla vakiokertoimen arvoksi noin 1,08 jolloin päivittäinen energiamäärä on sama kuin peruskuorman ja latauskuorman energioiden summa 212 GWh/a. Kuvasta 7.5 havaitaan, että muuntajien kuormitus on kasvanut lähtötilanteeseen verrattuna jonkin verran. Kuormituksen lisäämisen jälkeen jo lähes 25 % on ylikuormassa huippukuorma aikaan.



Kuva 7.5 Tarkasteltavan verkon 20/0,4 kV muuntajien kuormitus vakiokerroin määrittelyn kautta.

Kuvassa 7.6 on Martinkylän Nikkilän lähdön muuntajien suhteellinen kuormitus tilanteessa, jossa kuormitusta on lisätty vakiokertoimella. Kuvasta havaitaan pieni kuormituksen kasvu alkutilanteeseen verrattuna. Vakiokerroinmenetelmän maltillisuuden vuoksi vaikuttaa siltä, että verkko kestäisi kuormituksen lisäämistä pienillä saneeraustoimilla. Lähtötilanteeseen verrattuna vain kaksi muuntajaa on ylittänyt 100 % kuormituksen rajan.



Kuva 7.6 Martinkylän 110/20 kV sähköaseman Nikkilän 20 kV johtolähdön muuntopiirien suhteellinen kuormitus. Kuormitusta on kasvatettu vakiokertoimella 1,08. Pystyakseli rajoitettu 200 % havainnollisuuden vuoksi.

Kuvasta 7.6 havaitaan, että kuormituksen kasvu on tasaista eli jokaisen muuntopiirin huippukuormitus kasvaa suhteellisesti keskimäärin saman verran. Kokonaisuudessa huippukuorman kasvu on noin 18 %, joka on varsin kohtuullinen, kun huomioidaan, että kuormaa ei lisätä verkkoon kerralla vaan kuormitus kasvaisi hiljalleen kymmenien vuosien aikana. Esimerkiksi 10 vuoden tarkastelujaksolla vuotuinen kuormituksen kasvu olisi 1,7 %/a tai 30 vuoden tarkastelujaksolla 0,6 %/a. Alueella tavanomainen sähkökäytön kasvu on 2–4 %/a.

Simuloinnin tulosten perusteella ei voida tehdä päätelmiä verkon kestävydestä sähköautojen latauskuorman yhteydessä, koska menetelmä ei ole soveltuva kyseessä olevan kaltaisen kuorman mallintamiseen. Sähköautojen latauksen aiheuttaman sähkökäytön lisääntyminen vaikuttaa menetelmän perusteella olevan pienempää kuin alueella normaalisti tapahtuva kasvu sähkökäytössä. Menetelmä antaa yksipuolisen kuvan kuormituksesta, koska kuormituksen painottumista tietyille ajoille ei huomioida.

Menetelmä sopii paremmin peruskuorman lisääntymisen tarkasteluun oletuksella, että kuormitus kasvaisi joka paikassa tasaisesti. Todellisuudessa edellinen-

kään oletus ei useissa tilanteissa toteudu, koska kuormituksen kasvu ei ole tasaisesti alueellisesti vaan kasvu keskittyy pääasiassa taajamien kasvukeskuksiin ja uusille asuinalueille. Näissäkin tilanteissa vakiokerrointa olisi sovellettava alueellisiin tarkasteluihin eikä koko verkkoon.

Simuloinnin tulosten perusteella ei ole aiheellista tehdä investointilaskelmia, koska sähköautojen latauksen aiheuttama kuormituksen kasvu on pientä verrattuna alueen tyyppilliseen kuormituksen kasvuun. Näin ollen myöskään siihen pohjautuvat investointi- tai kehitysesimerkit eivät välttämättä kerro totuutta käsiteltävän kuormituksen aiheuttamista todellisista kuluista.

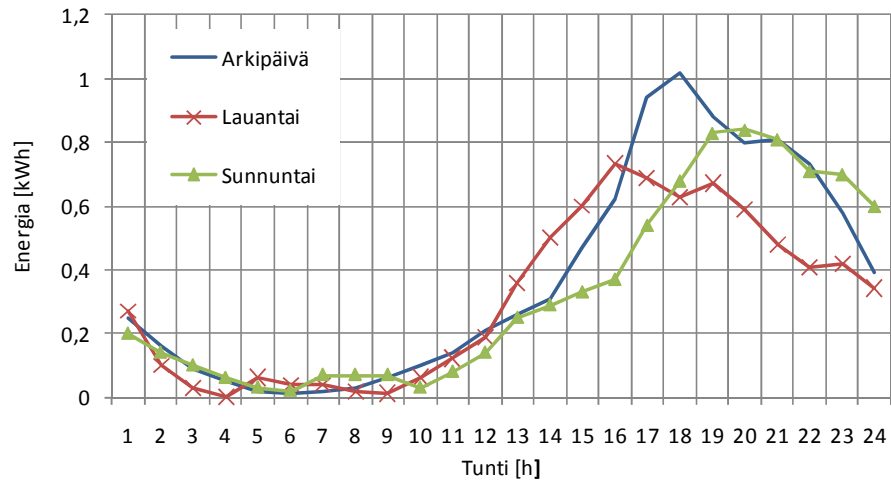
7.1.4 Kuormituksen kasvun simulointi kuormitusmalleja muokkaamalla

Sähköautojen pikalatauksen kuormituksen aiheuttamat verkkovaikutukset tulevat paremmin esille simuloinnissa kuormitusmalleja muokkaamalla kuin ainoastaan vakiokertoimella kuormaa kasvattamalla. Vakiokertoimella kuormaa kasvatettaessa kuormituksen luonne jää kokonaan huomioimatta, koska menetelmä ei ota kantaa kuorman ajankohtaa ja paikkaan. Kuormitusmalleja muokkaamalla saadaan aikaan simulointimenetelmä, joka ottaa kantaa myös kuorman ajankohtaan ja osittain myös paikkaan. Yksittäisen asiakasryhmän tyyppikäyrää voidaan muokata siten, että siihen lisätään sähköauton latauksen aiheuttama kuormitus tai verkkoon voidaan lisätä uusia kuormituspisteitä sähköauton latausta kuvaavilla kuormituskäyrillä.

Kuormitusmallin rakentamiseen on monta vaihtoehtoa. Malli voidaan tehdä puhtaasti olettamuksiin perustuen, mutta tällöin ongelmana on tulosten luotettavuus ja helppo kyseenalaistaminen, koska lähtöarvot eivät perustu empiiriseen tutkimukseen. Parempi kuva kuormituksesta saadaan, jos malli voidaan kehittää ihmisten liikkumiseen pohjautuen esimerkiksi työpaikkojen sijainnin ja työaikojen perusteella. On kuitenkin muistettava, että tämäkin menetelmä perustuu moniin olettamuksiin. Toistaiseksi lupaavin vaihtoehto ajoneuvojen käytön arviointiin on arvioida ihmisten liikkumista henkilöliikennetutkimuksen perusteella, joka kuvaa varsin hyvin keskimääräisen ihmisen liikkumista.

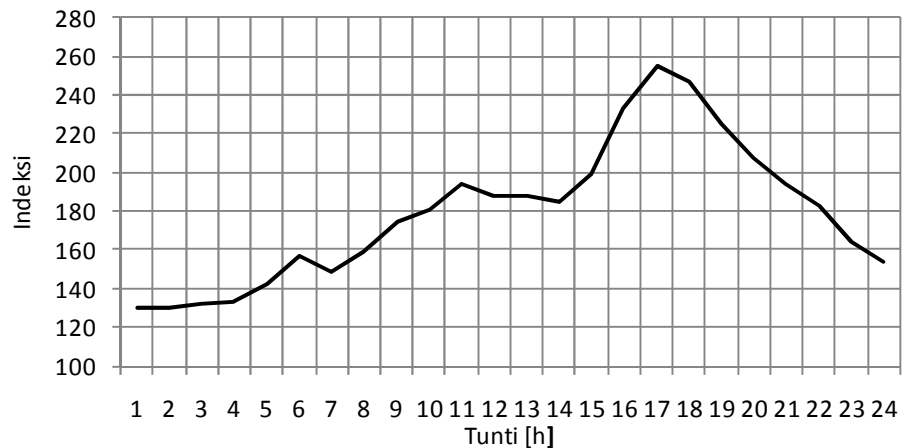
Henkilöliikennetutkimuksen (Henkilöliikennetutkimus 2006) raakadataa on käsitelty TTY:n tutkimuksessa. Rautiaisen tutkimuksen tavoitteena on ollut määrittää sähköautojen lataustarve ja ajankohta käyttäen apuna henkilöliikennetutkimuksen dataa. Haastattelujen pohjalta saatujen tietojen perusteella on voitu määrittää ihmisten keskimääräiset ajomatkat ja auton käytön ajankohdat. Näiden tietojen pohjalta on tehty malli, joka kuvaa yhden keskimääräisen ihmisen autonkäytön tarvitsemaa energiaa eli lataustarvetta. Lataustarpeen mallintamisen yhteydessä on tehty joukko oletuksia, kuten mm. auton lataus tapahtuu ainoastaan kotona, auton akulla on rajallinen kapasiteetti ja akun lataus tapahtuu vakioteholla. (Rautiainen et al. 2010)

Rautiaisen tutkimus kuvaa sähköauton latauskuormaa oletuksella, että auto ladataan kotona aina ajetun matkan jälkeen. Kuormamalli esittää keskimääräisen energiatarpeen kullekin tunnille. Menetelmä antaa hyvän kuvan kuorman ajoitumisesta vuorokauden eri tunneille. Haasteena on kuitenkin ihmisten käyttäytymisen ennustaminen ja useiden latauspaikkojen määrä. Autojen lataaminen ei välttämättä tapahdu ainoastaan kotona vaan voi tapahtua esimerkiksi työpaikalla tai kauppamatkalla. Kuvassa 7.7 on henkilöliikennetutkimuksen perusteella laadittu sähköauton latauskäyrä energiamuodossa vuorokauden tunneille. Kuvassa on viikkokuormituksen lisäksi lauantain ja sunnuntain kuormitusmallit. Kuvan mallissa on summa kahden 3 kW latausta käyttävän autoilijan lataustarpeesta. Latauskäyrän voidaan olettaa vastaavan hyvin keskimääräistä taloutta, jossa yhden auton kuormitus on noin 1,8 hlö/auto.



Kuva 7.7 Sähköauton latauksen kuormitusmalli. (Rautiainen et al. 2010)

Kuvan 7.7 perusteella havaitaan, että kuormitus painottuu pääasiassa toimistotyöajan päättymisen jälkeiselle ajalle. Hälyttävänä voidaan pitää illalla ajoittuvaa kuormitusta, joka on osittain päällekkäinen peruskuorman kanssa kuten kuvasta 7.7 ja 7.8 havaitaan. Kuvassa 7.8 on sähkölämmityksellä varustetun omakotitalon kuormituksen tyypikkäyrä.



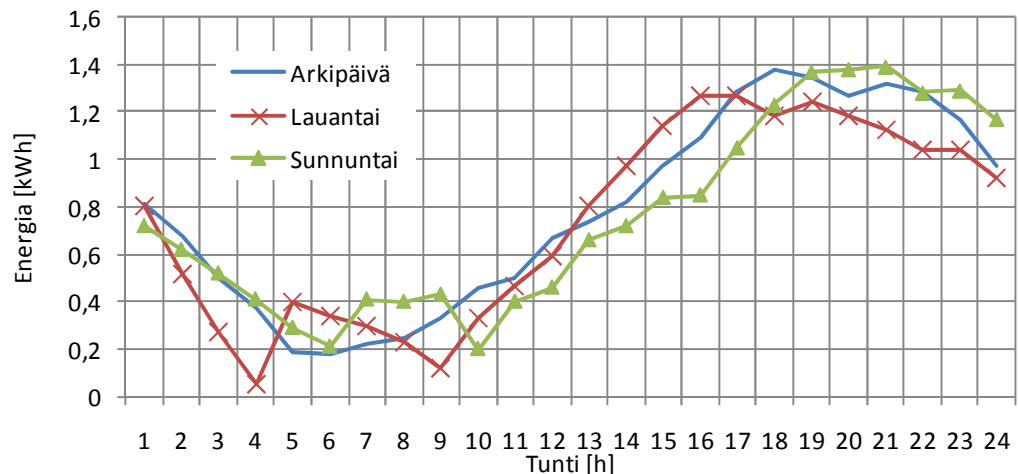
Kuva 7.8 Sähkölämmitteisen omakotitalon tyypikkäyrä 2. talviviikonsarjan aattopäivältä. Käyrässä on yhdistetty tunti-indeksi ja 2 -viikkoindeksi.

Simuloinnin kannalta on tärkeää ottaa huomioon myös kuormituksen hajonta, jotta tehohuippujen kokoluokka saadaan järkevälle tasolle. Hajontojen summaa-

misessä on tehtävä oletus, että hajonta vastaa normaalijakaumaa, vaikka Rautiaisen tutkimus osoittaa, että jakaumassa suurin osa latauksesta on hyvin lyhytaikaista tai kokotunnin jatkuvaa. Osatunnin mittaisten latausten määrä on pieni verrattuna hyvin lyhyisiin tai kokotunnin kestävään lataukseen. Koska parempaa olettamusta ei voi tehdä, lasketaan summa normaalijakaumien summayhtälön perusteella seuraavasti

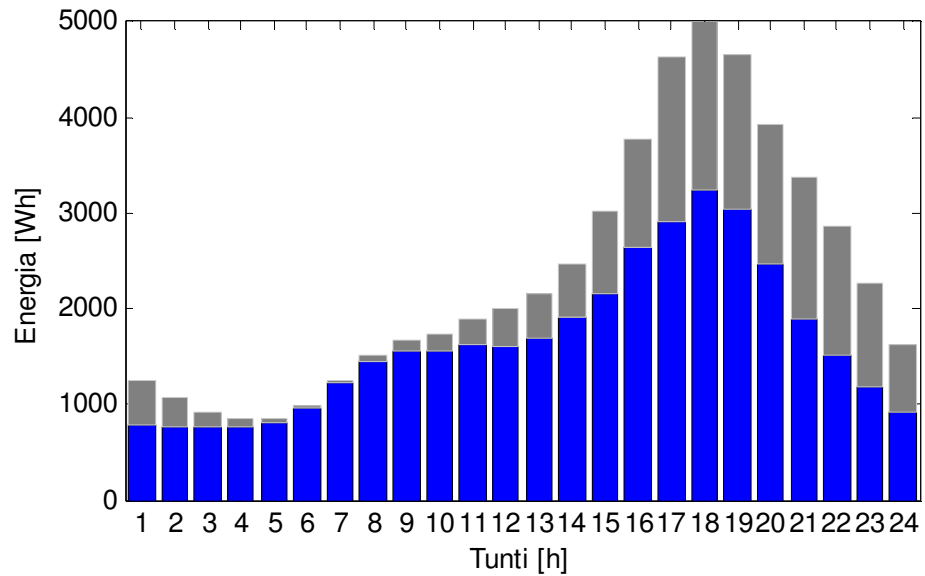
$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (7.2)$$

jossa σ_{tot} on hajontojen summa sekä σ_1 ja σ_2 ovat peruskuorman ja latauskuorman hajonta. Kuvasta 7.9 voidaan todeta hajonnan olevan suurimmillaan illan tunteilla, jolloin myös latauskuormitus on suurimmillaan.



Kuva 7.9 Sähköauton latauksen kuormitusmallin hajonta. (Rautiainen et al. 2010)

Edellä esitettyjen käyrien perusteella voidaan tehdä varaavalla sähkölämmityksellä varustetulle omakotitalolle summakäyrä 7.10, joissa on huomioitu latauksen vaikutus kuormitukseen. Simuloinnin yhteydessä alkuperäiset tyyppikäyrät korvataan uusilla latauskuorman sisältävillä käyrillä ja lisäksi kunkin asiakkaan päiväenergiaa kasvatetaan yhden keskimääräisen talouden päivittäisen lasketun energiatarpeen verran (13 kWh/d).



Kuva 7.10 Yhdistelmäkäyrä, jossa sähkölämmitteisen omakotitalon peruskuormitus viikolla kolme ja sähköauton latauskuorma. Asiakkaan vuosienergia on 10 MWh ilman sähköauton latauskuormaa.

Käsiteltävän verkon asiakasjakauma on hyvin suorasähkölämmitys painottunut. Verkon asiakkaista 36 % on suoraa sähkölämmitystä käyttäviä asiakkaita. Asiakkaista 54 % ei käytä lainkaan sähköä lämmitykseen verkkotietokannan tyyppikäyräluokituksen mukaan. Taulukossa 7.2 on nähtävillä muiden asiakasryhmien jakautuminen tyyppikäyrittäin.

Taulukko 7.2 Tarkasteltavan verkon asiakasmäärät tyyppikäyrittäin.

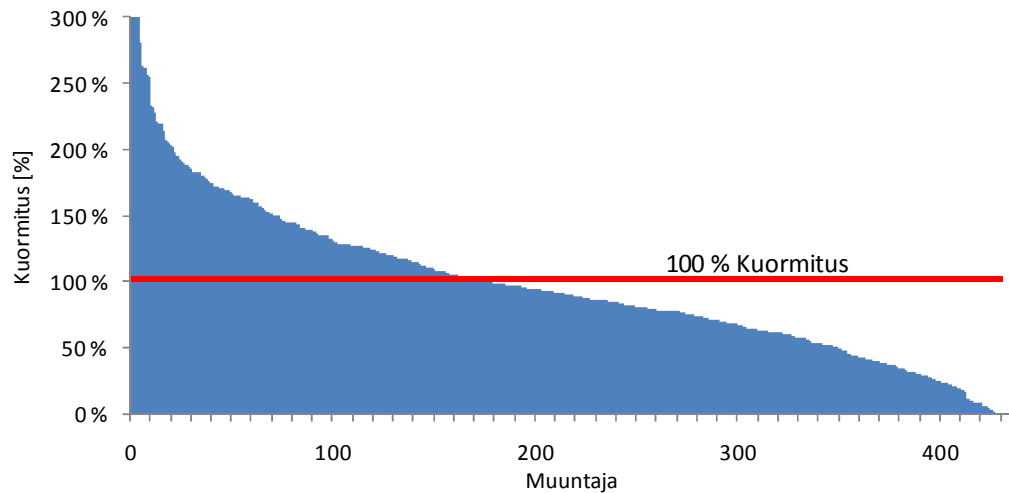
Numero	Selite	Määrä [kpl]	Suhteellinen osuus [%]
1	Omakotitalo, suorasähkölämmitys	2593	36,1
2	Omakotitalo, ostittain varaava sähkölämmitys	276	3,8
3	Omakotitalo, varaava sähkölämmitys	49	0,7
4	Omakotitalo, lämpöpumppu	0	0,0
5	Omakotitalo, 2_tariffi	8	0,1
6	Omakotitalo, sähkökiuas, ei sähkölämmitystä	3883	54,1
-	muut	375	5,2
	Σ	7184	

Simuloinnin tulokset käsitellään keskijänniteverkon osalta seuraavissa kappaleissa ja pienjänniteverkon osalta kohdassa 7.2. Simulointi on tehty levinneisyysasteilla 25 %, 50 % ja 100 %. Täydellinen autojen levinneisyys tarkoittaa tässä yhteydessä, että jokaisessa omakotitalossa ja rivitaloasunnossa on yksi sähköauto. Todellisuudessa sähköautojen määrä vaihtelisi alueittain, mutta yksinkertaistuksen vuoksi käytetään keskimääräistä arvoa. Tarkemman tuloksen aikaan saamiseksi olisi tunnettava autojen jakauma alueittain. Sähköautoille voitaisiin käyttää samaa jakaumaan, kuin perinteistenkin polttomoottoriautojen tapauksessa. Suomessa on taloutta kohden keskimäärin yksi auto (Tilastokeskus 2010,a; Tilastokeskus 2010,b).

Kerrostaloasuntojen vaikutusta kuormituksen kasvuun ei huomioida tässä yhteydessä, koska autojen latausmahdollisuudet kerrostalojen yhteydessä olisi ensin määritettävä. Kerrostalot voivat olla hyvin haasteellinen kohde kuormituksen kasvun ennustamiselle vaihtelevan autopaikkamäärän vuoksi. Osa autopaikoista voi olla katujen varsilla ilman latausmahdollisuutta ja osa parkkialueella, jossa on sähköautojen kannalta ajateltuna liian pienelle kuormalle mitoitettua lämmityspistokkeet.

Verkon saneeraus autojen 25 % levinneisyysasteella

Verkon kuormituksen kasvu on merkittävää jo 25 % autojen levinneisyysasteella. Kuvassa 7.11 on esitetty muuntajien verkon jakelumuuntajien kuormitus. Havaitaan, että jopa 35 % muuntajista käy ylikuormassa. Latauskuorman vaikutus huippukuormaan on sen verran suuri, että verkko vaatii huomattavia saneeraustoimia, jotta kyseisen kuormituksen lisääminen verkkoon olisi mahdollista. Yhteenlaskettu muuntajakapasiteetin ylittävä teho on 16,5 MW verkon huipputehon ollessa 62,1 MW. Muuntajien kuormituksen muutos indikoi myös tarvetta tarkastella keskijänniteverkon tilaa.



Kuva 7.11 Muuntajien kuormitus sähköautojen 25 % levinneisyysasteella. Pysty akseli on rajoitettu 300 % havainnollisuuden vuoksi.

Taulukkoon 7.3 on laskettu verkon häviökustannusten muutos kuormituksen kasvun seurauksena. Häviökustannukset kasvavat jopa 122 % huippukuorman kasvaessa 48 %. Suurin jännitteenalenema keskijänniteverkossa jää alle 7 %.

Taulukko 7.3 Verkon huipputehon ja häviöiden muutos sähköautojen levinneisyysasteella 25 %.

	Huipputeho [MW]	Häviöteho [MW]	Häviöenergia [GWh/a]	Häviökustannus [k€/a]
Nykytilanne	42,1	0,55	1,20	276
25 % levinneisyys	62,1	1,33	2,46	612
Muutos	48 %	142 %	105 %	122 %

Taulukossa 7.4 on eritelty verkon saneeraustarvetta johtolähdöittäin ja laskettu saneerauksen kustannukset käyttäen kapasiteetti kustannusta. Kapasiteetin hinta perustuu ns. verkkovolyymiin, jossa koko jakeluverkkoa tarkastellaan kokonaisarvon ja siirretyn tehon kautta. Hinta voidaan mieltää ns. rajakustannuksena; paljonko verkkoon on investoitava, jotta lisäkuorma voidaan hoitaa. (Lassila 2009) Kapasiteetin hintana keskijänniteverkossa voidaan tässä tarkastelussa käyttää 350 €/kW. Hinta pohjautuu tarkasteltavan verkon jälleenhankinta-arvon ja verkon huipputehon suhteeseen.

Taulukko 7.4 Keskijänniteverkon saneerauskustannukset.

	Laskennallinen huipputeho [MW]	Jäljellä oleva kapasiteetti $U_{hmax} > 5\%$ tai $I_L > I_{hmax}$ [MW]	Laskennallinen huipputeho 25 % levinneisyysasteella [MW]	Vahvistamistarve 25 % levinneisyysasteella [MW]	Verkon vahvistamisen kustannus [k€]
Kallbäck					
Ingman	5,1	2,7	7,7	0,0	0
Kalkstrand	2,6	3,3	3,3	0,0	0
Söderkulla	1,1	10,0	1,3	0,0	0
Gumbostrand	1,6	1,8	2,7	0,0	0
Box	1,3	4,9	1,9	0,0	0
Galthagen	0,6	12,0	1,1	0,0	0
Spjutsund	2,0	0,5	3,5	1,0	350
Massby					
Nikkilä	1,6	2,8	2,2	0,0	0
Immersby	4,0	0,7	6,1	1,4	483
Söderkulla	0,1	10,0	0,1	0,0	0
Ingman 1 ja 2	4,1	5,0	4,1	0,0	0
Martinkylä					
Nikkilä	7,1	1,7	10,9	2,1	718
Paippinen	2,8	1,5	4,3	0,0	0
Porvoo	2,3	1,7	3,6	0,0	0
Saxas	3,1	0,6	4,8	1,1	371
Hindsby	1,6	2,4	2,7	0,0	0
Talma	0,8	4,5	1,3	0,0	0
Σ		66	61	5	1921

Saneeraustarve on laskettu jäljellä oleva kapasiteetti ensin hyödyntäen. Voidaan todeta, että verkon saneeraustarve painottuu johtolähdöille, joiden kuormitus oli entuudestaan runsasta johtolähdön mitoituskeeseen nähden. Kokonaisuudessaan keskijänniteverkon saneeraus taulukon 7.4 esittämällä tavalla maksaa noin 1,9 M€.

Saneerauksen yhteydessä on tarkasteltava verkkoa myös taloudellisessa mielessä teknistaloudellisen laskennan keinoin tarkastelemalla esimerkiksi keskijänniteverkon johtimien vahvistamista johdinvaihdon kannattavan rajatehon kannalta. Rajatehoesimerkit on laskettu kappaleessa 6.3.1.

Kustannuksiin on laskettava lisäksi jakelumuuntajien saneerauskustannukset. Muuntajille voidaan soveltaa korvaavan ja korvattavan muuntajakoneen hinnan erotusta. Laskemalla kaikki tapaukset yhteen saadaan muuntajien saneerauksen kokonaiskustannus. Muuntamorakenteiden kustannuksia ei tarvitse huomioida, koska useimmissa tapauksissa vaaditaan ainoastaan jakelumuuntajan vaihto. Muuntajakapasiteetin kasvattaminen 16 MVA maksaisi noin 700 k€ kapasiteetin hinnan ollessa noin 44 k€/MVA. Pienjänniteverkolle aiheutuvat kustannukset arvioidaan myöhemmin.

Verkon kuormitusta voidaan tarkastella myös vuotuisena kasvuprosenttina, joka tässä tilanteessa 10 vuoden tarkastelujaksolla olisi 4 %/a. Jakeluverkon kannalta 4 %/a kuormituksen kasvu on melko suuri arvio, jos tilannetta verrataan verkkoon, jossa sähköautojen lataaminen ei ole yleistymässä. 30 vuoden tarkastelujaksolla vuotuinen kasvuprosentti on 1,3 %/a. Saneerauskustannuksien suuruutta arvioitaessa on syytä pitää mielessä tarkastelujakson pituus. Sähköautojen yleistyminen ei tapahdu hetkessä, vaan autojen määrä tulee lisääntymään vähitellen, joten myös verkon saneeraus tapahtuu pitkällä aikavälillä.

Verkon saneeraus autojen 50 % levinneisyysasteella

Verkolle aiheutuvat haasteet kasvavat kuormituksen kasvun myötä yhä enemmän 50 % levinneisyysasteella huippukuorma kasvaa jo lähes kaksinkertaiseksi alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Taulukossa 7.5 on verkon esitetty verkon tunnuslukujen muutokset. Kuormituksen kasvu vaikuttaa etenkin häviötehon suuren kasvuun ja hieman myös häviökustannusten kasvuun.

Taulukko 7.5 Verkon huipputehon ja häviöiden muutos sähköautojen levinneisyysasteella 50 %.

	Huipputeho [MW]	Häviöteho [MW]	Häviöenergia [GWh/a]	Häviökustannus [k€/a]
0 % levinneisyys	42,1	0,55	1,20	276
50 % levinneisyys	82,3	2,52	4,32	1090
Muutos	95 %	358 %	260 %	294 %

Taulukossa 7.6 on listattu sähköautojen 50 % levinneisyysasteen aiheuttaman kuormituksen kasvu ja verkon saneerauskustannukset teknisten reunaehto-
täyttämisen vuoksi.

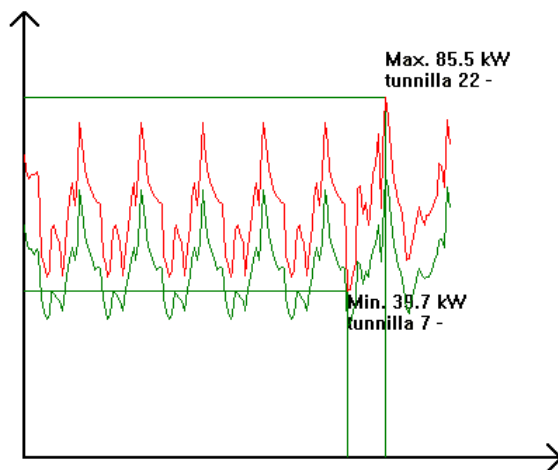
Taulukko 7.6 Keskijänniteverkon saneerauskustannukset.

	Laskennallinen huipputeho [MW]	Jäljellä oleva kapasiteetti $U_{hmax} > 5\% \text{ tai } I_L > I_{hmax}$ [MW]	Laskennallinen huipputeho 50 % levinneisyys- asteella [MW]	Vahvistamistarve 50 % levinneisyys- asteella [MW]	Verkon vahvistamisen kustannus [k€]
Kallbäck					
Ingman	5,1	2,7	10,3	2,5	882
Kalkstrand	2,6	3,3	3,9	0,0	0
Söderkulla	1,1	10,0	1,5	0,0	0
Gumbostrand	1,6	1,8	3,7	0,3	116
Box	1,3	4,9	2,5	0,0	0
Galthagen	0,6	12,0	1,6	0,0	0
Spjutsund	2,0	0,5	5,3	2,8	968
Massby					
Nikkilä	1,6	2,8	3,0	0,0	0
Immersby	4,0	0,7	8,1	3,4	1190
Söderkulla	0,1	10,0	0,1	0,0	0
Ingman 1 ja 2	4,1	5,0	4,1	0,0	0
Martinkylä					
Nikkilä	7,1	1,7	14,4	5,6	1960
Paippinen	2,8	1,5	5,9	1,6	567
Porvoo	2,3	1,7	5,0	1,0	350
Saxas	3,1	0,6	6,3	2,6	910
Hindsby	1,6	2,4	3,2	0,0	0
Talma	0,8	4,5	1,6	0,0	0
Σ		66	80	20	6943

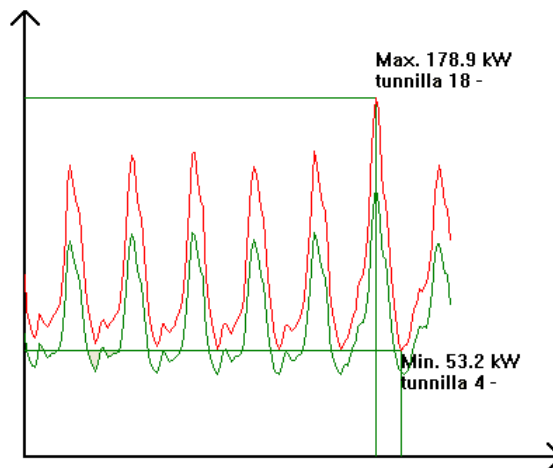
Verkon saneeraaminen on 25 % levinneisyysasteen saneeraustoimenpiteisiin verrattuna huomattavasti laajempaa. Yli puoleen johtolähdöistä joudutaan kohdistamaan saneeraustoimenpiteitä, jotta verkko voidaan pitää toiminnassa alle 5 % jännitteenalenemilla. Kokonaiskustannuksia keskijänniteverkon saneerauk-

sesta kertyy 6,9 M€. Näillä saneeraustoimenpiteillä verkko saatetaan tilaan, jossa verkko on mitoitettu simuloidun kuorman tasolle. Jos kuormitus kasvaa, joudutaan verkossa tekemään lisää saneeraustoimenpiteitä.

Kuormitus on latauskuorman lisäyksen seurauksena muodostunut hyvin vaihtelevaksi eli ero peruskuorman ja huippukuorman välillä on suuri. Voidaan tarkastella esimerkiksi erään muuntopiirin kuormitusta lähtötilanteessa ja kuormituksen lisäämisen jälkeen. Kuvassa 7.12 on esitetty erään muuntopiirin kuormituskäyrä ilman latauskuormaa talviviikolta ja kuvassa 7.13 saman muuntopiirin kuormituskäyrä latauskuorman kanssa.



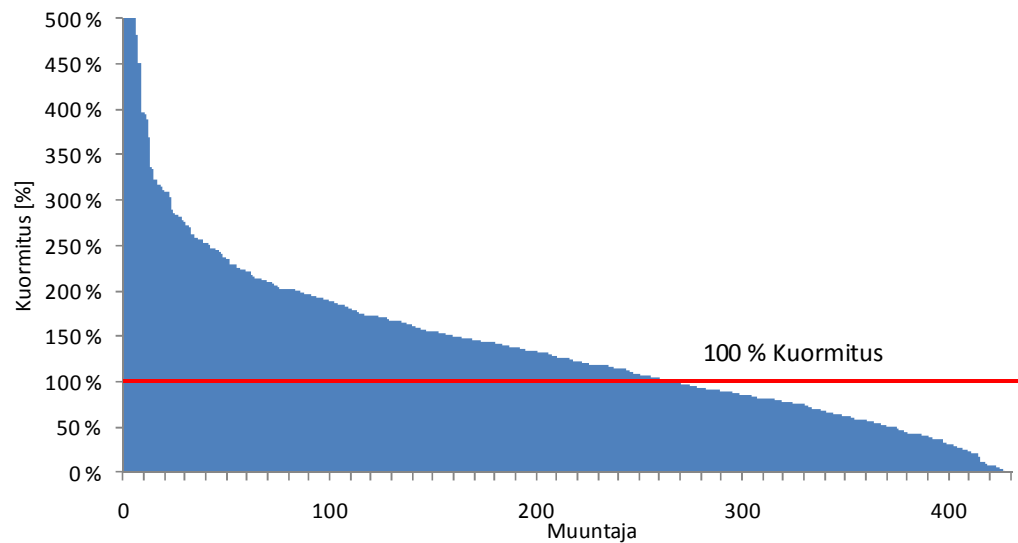
Kuva 7.12 Erään pienen muuntopiirin kuormituskäyrä talviviikolta. Kuvassa on merkitty lauantaille ajoittuva kuormituspiikki ja pienin kuormitus.



Kuva 7.13 Erään pienen muuntopiirin kuormituskäyrä jossa esiintyy sähköautojen latausta 50 % osuudella talouksista. Kuvassa on merkitty lauantaille ajoittuva kuormituspiikki ja pienin kuormitus.

Kuormituskäyristä havaitaan, että myös huippukuormituksen ajankohta on muuttunut. Lähtötilanteessa huippukuorma ajoittui pääasiassa illalle kello 22 eteenpäin 2 -aikatariffin vuoksi. Sähköautojen latauksessa ei ole huomioitu, että lataus voisi painottua kaksi -aikatariffin vuoksi eritavalla. Tyypillisesti suomalaisessa sähkönkulutuksessa on havaittavissa kulutuksen ajoittumista kello 22 jälkeiselle ajalle myös muun kuorman kuin sähkölämmityksen osalta. Kuluttajat suosivat halvempaa yösähköä, jos se on mahdollista. Sähköautojen tapauksessa on vaikea ennustaa onko päivä- ja yösähkön hintaerolla vaikutusta kulutustottumuksiin, vai onko auton akun lataaminen pientä säästöä tärkeämpää. Latauksen ajoittumisen tarkempi ennustamisen latauksen ajoittumisen suhteen vaatisi laajamittaista tutkimusta ihmisten tulevaisuuden lataustottumuksia koskien.

Kuvassa 7.14 on esitetty verkon kaikkien muuntajien huippukuormitus latauskuorman kanssa. Voidaan todeta, että jakelumuuntajakapasiteetin mitoitus on täysin riittämätön latauksen aiheuttaman huippukuormituksen käsittelyyn ja että muuntajat vaatisivat laajamittaista saneerausta, mikäli simuloitun kaltainen kuormitus halutaan kytkeä verkkoon. Jakelumuuntajien 40 MVA lisäkapasiteetin vaatimat vahvistamistoimet keskijänniteverkossa aiheuttaisivat kustannuksia 1,3 M€. Laskettu muuntajien saneerauskustannus perustuu muuntajakapasiteetin keskimääräiseen hintaan.



Kuva 7.14 Muuntajien kuormitus sähköautojen 50 % levinneisyysasteella. Kuvaajan pystyakseli on rajoitettu 500 % havainnollisuuden vuoksi.

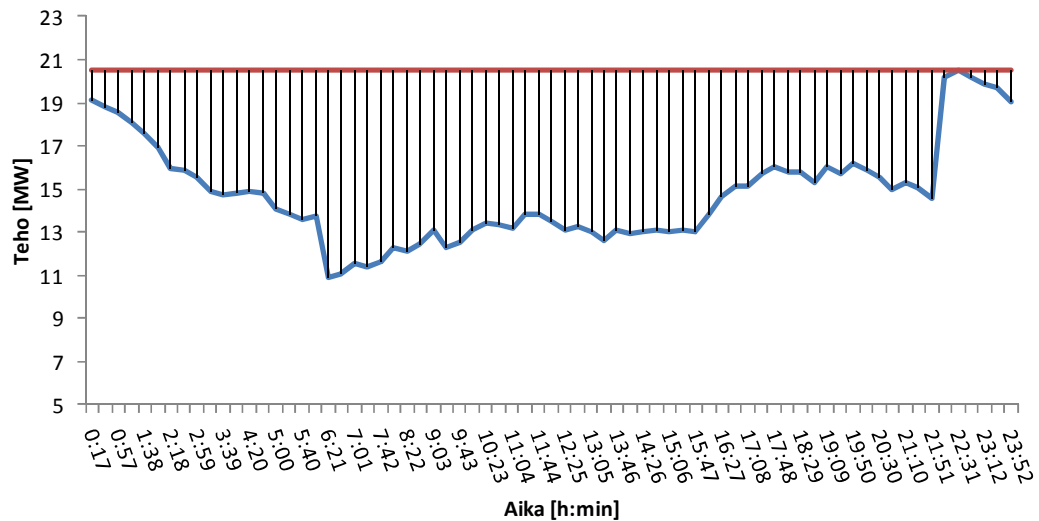
7.1.5 Latauksen keskijänniteverkkovaikutusten yhteenveto

Edellä esitettyjen tarkastelujen pohjalta voidaan todeta, että latauskuorman määrittäminen on haastavaa. Verkkovaikutukset ja saneeraus kustannukset vaihtelevat menetelmästä riippuen huomattavasti. Latauskuorman lisääntyminen ei todennäköisesti ole ajankohtaista vielä moneen vuoteen, mutta vuosikymmenien kuluessa haaste on todellinen. Latauksen toteuttaminen voisi tapahtua älykkäästi osittain verkon rajoitteiden ja vahvistustoimien summana.

Energiamääränä ajateltuna latauskuorma ei ole kovin suuri, vain noin 13 kWh/d autoa kohden. Jos latauskuorma olisi mahdollista jakaa vuorokauden tunneille tasan, olisi keskimääräinen kuorma vain 540 W. Toisaalta, jos lataus tapahtuisi 12 h aikana, ei kuorma silloinkaan olisi kuin hieman yli 1 kW/auto.

Kuvassa 7.15 on Martinkylän 110/20 kV sähköaseman kuormituskäyrä erään vuorokauden ajalta. Kuvasta voidaan havaita, että huippukuormituksen ja pienimmän kuormituksen välinen ero on melko suuri vaikkakin pienempi kuin tyyppillisen jakelumuuntajan kuormitusvaihtelu. Kuvaan on piirretty alue, joka jää

huippukuormituksen arvon ja muiden tuntien väliin. Havaitaan että, suurimman osan ajasta sähköasemalla on käyttämätöntä kapasiteettia noin 5 MW huippukuormaan nähden. Kuvaan merkityn alueen pinta-ala on energiamäärä 135 MWh/d, joka voitaisiin periaatteessa hyödyntää sähköautojen lataukseen, jos sähköautojen latauskuormaa voitaisiin ohjata verkon ehdoilla. Teoreettisesti saatavalla energiamäärällä voitaisiin taata riittävä energiamäärä jopa 10000 sähköautolle eli koko tarkasteltavan verkon sähköautokanta voitaisiin teoriassa ladata yhden sähköaseman olemassa olevalla kapasiteetilla.

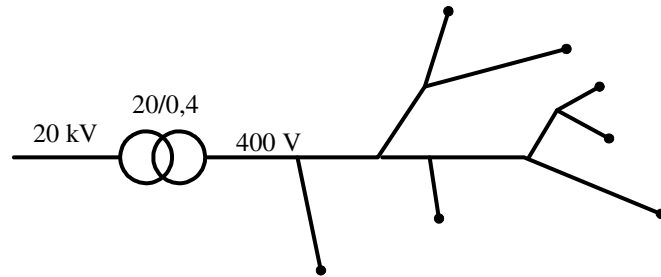


Kuva 7.15 Martinkylän 110/20 kV sähköaseman kuormitus vuorokauden ajalta.

7.2 Pienjänniteverkko

Sähköautojen latauskuormaa arvioitaessa pienjänniteverkolla on keskeinen rooli, koska kaikki lataus tapahtuu pienjänniteverkon välityksellä. Latauskuorma painottuu pääasiassa iltaan eli kuormitus ajoittuu päällekkäin omakotitalojen huippukuormituksen kanssa. Tästä muodostuu haaste pienjänniteverkoille sähköautojen yleistymisen myötä. Pienjänniteverkkojen mitoitus perustuu usein sähköturvallisuuden toteutumiseen eli verkko mitoitetaan siten, että oikosulkuvirrat olisivat riittävän suuret kuluttajan turvallisuuden kannalta. Myös jännitteenlaadun on oltava riittävän hyvä, eli jännitteenalenema ei saa ylittää standardien määrittä-

mään rajaa. Pienjännitemuuntopiirien 20/0,4 kV muuntajat on usein mitoitettu siten, että niillä on hieman pelivaraa kuormituksen kasvattamiselle.

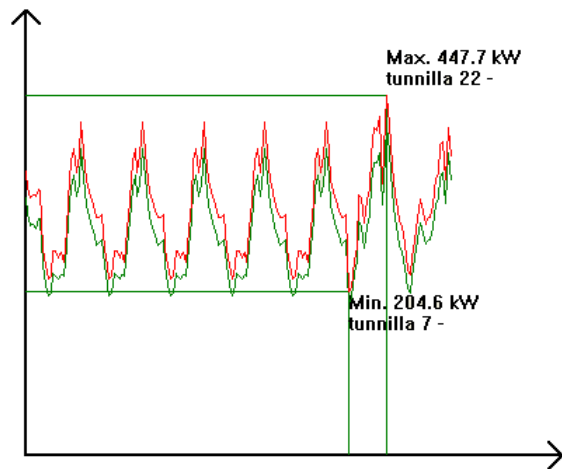


Kuva 7.16 Tyypillisen muuntopiirin rakenne. Syöttö tapahtuu 20 kV jakeluverkosta 20/0,4 kV muuntajan kautta 400 V pienjänniteverkkoon, jossa asiakkaat (mustat pisteet) ovat tyypillisesti puurakenteessa.

7.2.1 Taajamamuuntopiirin tarkastelu

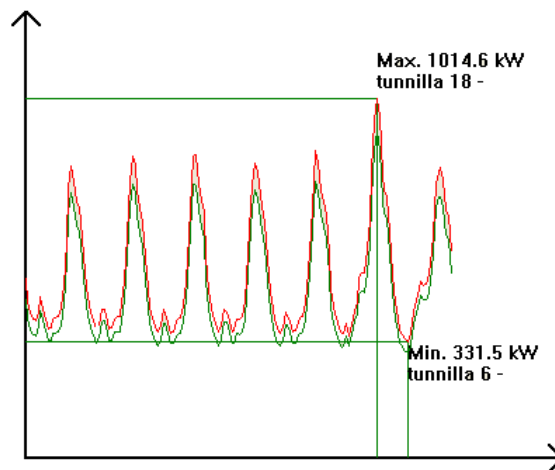
Taajamien muuntopiirit voivat olla hyvin haasteellisia sähköautojen yleistymisen myötä, koska autoja on paljon samalla alueella. Autojen yhteenlaskettu latausteho voi kasvaa suureksi. Seuraavassa esimerkissä tarkastellaan taajamamuuntopiirin tehon kehitystä latauskuormaa lisättäessä. Tarkastelu pohjautuu VTJ:n simuloititulosiin. Muuntopiirissä on 267 asiakasta, joista suurin osa on omakotitaloja joissa on suora sähkölämmitys. Muuntopiirin 20/0,4 kV muuntaja on kooltaan 500 kVA, jonka huippukuorma alkutilanteessa ilman latauskuormaa on 448 kW. Tarkastelun kohteena olevan muuntopiirin kuormitus on sen verran suurta, että muuntopiirin saneeraaminen olisi lähitulevaisuudessa tarpeen ilman sähköautojen latauskuormaakin. Latauskuorman lisääminen piirin kuormitukseen antaa kuitenkin hyvän käsityksen siitä paljon kuormitus kasvaa ja kuinka kuormituksen kasvu eroaa pienen muuntopiirin kuormituksen kasvusta sähköautojen pikalatauskuormaa lisättäessä. Samalla latauskuorman aiheuttamaa lisäkuormaa voidaan verrata luonnolliseen kuormituksen kasvuun muuntopiirissä.

Kuvassa 7.17 on muuntopiirin tehokäyrä josta ilmenee, että kuormitus on vaihtelevaa vaihdellen välillä 205–447 kW. Pienin kuormitus on noin puolet huippukuormasta. Huippukuorma ajoittuu pääasiassa illalle kello 18 ja 22 aikoihin. Verkon suurimmat jännitteenalenemat ovat luokkaa 10 %.



Kuva 7.17 Erään pienjännitemuuntopiirin 20/0,4 kV jakelumuuntajan kuormituskäyrä.

Latauskuorman lisääminen 25 % levinneisyysasteella aiheuttaa verkolle merkittävää ylikuormitusta. Jakelumuuntajan huipputeho on 1,1 MW eli yli kaksi kertaa muuntajan kapasiteetin verran. Osa verkon kaapeleista on ylikuormassa, joten verkon käyttö tällaisessa tilassa ei ole teknisten reunaehtojen puitteissa mahdollista. Kuvassa on 7.18 esitetty jakelumuuntajan kuormituskäyrä latauskuorman kanssa. Kuvasta voidaan todeta, että huippukuorman ja pienimmän kuorman suhde on kasvanut merkittävästi. Pienin kuorma on huippukuormaan verrattuna noin 30 %. Verkon saneeraustarpeen määrä on riippuvainen verkon lähtötilanteen kuormituksesta. Mitoitukseen nähden pienemmässä kuormassa olevat muuntopiirit tarvitsevat vähemmän saneerausta, kuin äärimmilleen kuormitetut verkot.



Kuva 7.18 Erään pienjännitemuuntopiirin jakelumuuntajan kuormituskäyrä tilanteessa jossa verkossa on sähköautojen latauskuormaa.

Simulointi osoittaa, että 50 % sähköautojenlevinneysasteella huippukuorma on 1,5 MW ja 100 % Levinneysasteella 2,4 MW. Molemmassa tilanteissa kuormituksen kasvua on niin paljon, että pienjänniteverkon käyttöä ei voida jatkaa nykytilassa.

Käytännössä edellä esitetyn kaltaisen kuormituksen lisääminen verkkoon tarkoittaisi lähes koko pienjänniteverkon uudelleen rakentamista. Verkkoon olisi lisättävä muuntajakapasiteettia vaihtamalla pienempiä muuntajia suurempiin tai jakamaan pienjänniteverkko pienempiin osiin ja lisäämään uusia jakelumuuntajia. Lisäksi osa verkon johtimista jouduttaisiin vaihtamaan, koska suurin sallittu kuormitettavuus on ylitetty ja osa johtimista jouduttaisiin vahvistamaan suurien jännitteenalennemien vuoksi. Verkon saneerauksen kustannukset olisivat mittavat, koska verkossa jouduttaisiin tekemään niin suuria muutostöitä.

Pienjänniteverkon saneerauskustannuksia on hyvin vaikea arvioida yleisellä tasolla, koska pienjänniteverkot voivat poiketa hyvin paljon toisistaan. Taajamissa pienjännitekaapeloinnin uusiminen on kalliimpaa kuin maaseudulla jossa kaapeloinnin uusimiseksi ei tarvitse avata katujen pinnoitusta. Myös pienjänniteverkkojen mitoitus voivat poiketa alueen mukaan hyvin paljon toisistaan. Saneer-

rauskustannusten arviointi on tehtävä tapauskohtaisesti pienjänniteverkon suunnitteluun perustuen.

Voidaan laskea arvio saneerauskustannuksista 50 % levinneisyysasteskenaarion mukaan. Kytettävän pienjänniteverkon alueen huippukuorma on simuloinnin mukaan 1,5 MW. Muuntopiiri jaetaan kahteen osaan siten että osien kuormitus on samansuuruinen. Molemmilla osilla on huipputeho 750 kW. Taulukossa 7.7 on laskelma arvioiduista kustannuksista. Laskennassa käytetyt hintatiedot perustuvat Energiamarkkinaviraston ilmoittamiin vuoden 2010 sähköverkkokomponenttien yksikköhintoihin.

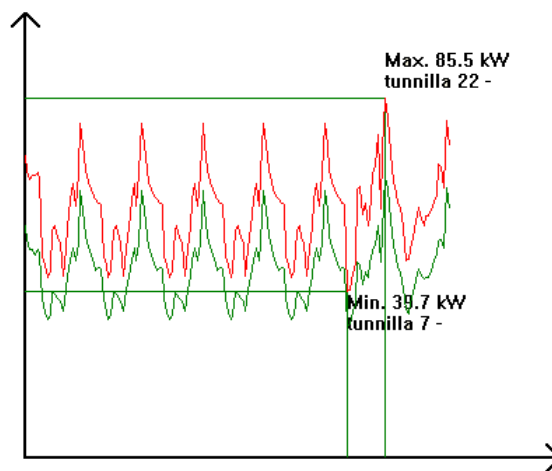
Taulukko 7.7 Pienjänniteverkon saneerauksen kustannukset.

	Määrä	Yksikköhinta [k€]	Hinta [k€]
Muuntaja 1 MVA	2 kpl	14	29
Puistomuuntamo	1 kpl	27	27
Kaapeli	7 km	19	133
Kaapelin kaivu	7 km	21	150
Σ			339

Laskennassa on oletettu, että olemassa oleva muuntamo voidaan hyödyntää saneerauksen yhteydessä. Suuri kustannuserä muodostuu kaapelien asennuksesta ja kaapeleista. Kaapelien lopullinen hinta määräytyy tapauskohtaisesti tarpeellisen poikkipinta-alan mukaan. Laskennan tuloksena saadaan karkea arvio alueen pienjänniteverkon saneerauskustannuksista. Kustannukseksi muodostuu 339 k€. Asiakkaalle kohdistettuna kustannus on 1,27 k€/asiakas ja muuntopiirin johdinpituuden mukaan laskettuna 47 k€/km. Muuntopiirin kokonaisjohdinmäärä on 7,2 km. Saneerauksen kustannukset ovat merkittäviä tilanteessa, jossa lähtötilanteen kuormitus olisi pienempi. Käytännössä pienjänniteverkon jälleenhankinta hinta on samaa luokkaa kuin edellä esitetty saneerauskustannusarvio.

7.2.2 Haja-asutusalueen muuntopiiri

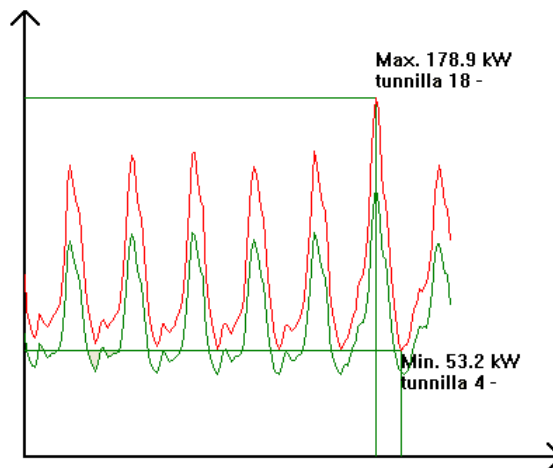
Tarkastellaan latauskuorman vaikutusta haja-asutusalueen muuntopiiriin jossa on yhteensä 16 asiakasta. Tarkasteltavan muuntopiirin huipputeho on alkutilanteessa 80 kW ja 20/0,4 kV jakelumuuntajana on 100 kVA muuntaja. Kuvassa 7.19 on muuntopiirin kuormituskäyrä josta käy ilmi, että kuormitus muistuttaa hyvin paljon isomman kappaleessa 7.2.1 tarkastellun muuntopiirin kuormitusta. Muuntopiireillä on yhdistävänä tekijänä samantyyppinen asiakasjakauma. Muuntopiirin 16 asiakkaasta 11 on suora sähkölämmitys.



Kuva 7.19 Erään pienjännitemuuntopiirin 20/0,4 kV jakelumuuntajan kuormituskäyrä.

Jakelumuuntajan kuormitus alkaa lähestyä muuntajan kapasiteetin rajaa, joten muuntajan vaihtaminen voi olla pian ajankohtaista myös ilman sähköautojen pikalatauksen lisäämistä verkkoon. Verkon kuormitustilanne on muuten hyvä, eikä saneeraukselle ole tarvetta.

Kuvassa 7.20 on muuntopiirin kuormituskäyrä sähköautokuorman lisäämisen jälkeen. Kuvan tilanteessa piiriin on lisätty latauskuormaa 50 % asiakkaista. Tarkastelu osoittaa, että muuntopiirin huipputehon muutos on suuri eikä muuntopiirillä ole edellytyksiä syöttää kuvan kaltaista kuormaa.



Kuva 7.20 Erään pienjännitemuuntopiirin 20/0,4 kV jakelumuuntajan kuormituskäyrä sähköautojen latauskuormalla.

Kuvaajasta havaitaan, että kuormitus on 5 % ylitystodennäköisyyden mukaan lisääntynyt alkuperäiseen kuormitushuippuun nähden noin kaksikertaiseksi. Kuormituksen suuri kasvu näkyy simuloinnissa suurien huipputuntien ajankohdalla ajoittuvien hajontojen takia. Yksittäisten latauskuormien päällekkäisyyden todennäköisyys on suurimmillaan tunnin illan tunnilla 18. Tästä seuraa simuloinnissa esiintyvä suuri kuormituspiikki.

Täydellisellä 100 % levinneisyysasteella kuormitus pienjänniteverkon huippukuorma on 270 kW. Tämänkin muuntopiirin tarkastelussa päädytään päätelmään, että kapasiteettiä on lisättävä, mikäli latauskuormaa ei ohjata esimerkiksi älykällä ohjauksella.

Saneerauskustannukset voidaan arvioida samalla tavalla kuin edellisessä kappaleessa taajamamuuntopiirin yhteydessä. Taulukossa 7.8 on eritelty saneerauksen kustannukset pienjänniteverkon ja muuntajan osalta sähköautojen 50 % levinneisyyskenaarion mukaan. Laskennassa oletetaan, että muuntopiiriin ei tarvitse uusia muuntamorakenteita.

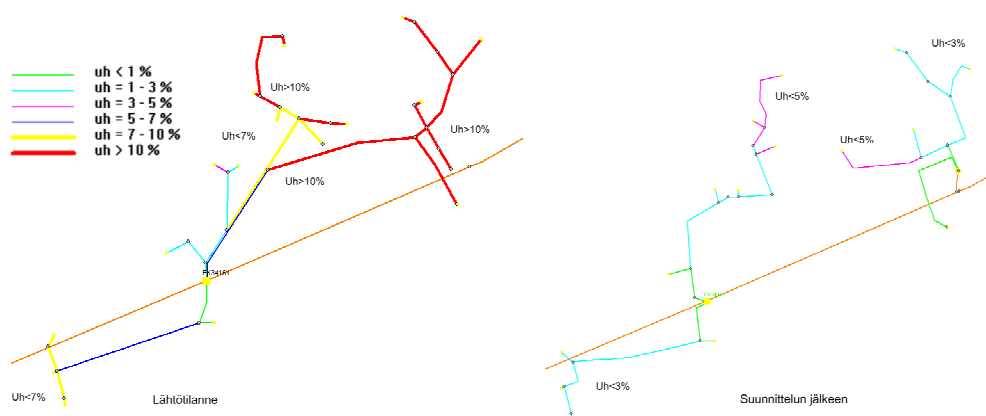
Taulukko 7.8 Pienjännitemuuntopiirin saneerauskustannukset.

	Määrä	Kappalehinta [k€]	Hinta [k€]
Muuntaja 200 kVA	1 kpl	6	6
Kaapeli	2 km	19	38
Kaapelin kaivu	2 km	10	20
Σ			64

Kokonaiskustannusarvio saneerauksesta on 64 k€. Asiakasta kohden laskettuna kustannus on 4 k€/asiakas, joka on suurempi kuin taajaman muuntopiirissä 1,3 k€/asiakas. Johtopituuden mukaan laskettu kustannus on 32 k€/km.

Muuntopiirin saneerauksen kustannukset voidaan määrittää tarkemmin, kun tunnetaan muuntopiirin rakenne yksityiskohtaisesti. Saneerausesimerkin kuormitus-taso on sähköautojen 50 % levinneisyysastetta vastaava. Muuntopiirin saneeraus on toteutettu pienjänniteverkon suunnittelu periaatteiden mukaan. Tarkastelu kohdistuu esimerkkiin jossa verkon ilmajohtot on vaihdettu saneeraus suunnitelmassa maakaapeleihin ja siirretty helppopääsyiseen maastoon kuten tienvarsille.

Alkuperäinen pienjänniteverkkokuva on nähtävissä liitteessä 3. Muuntopiiri on järkevää jakaa kahteen osaan ja asentaa uudelle pienjänniteverkolle uusi muuntamo ja jakelumuuntaja. Muuntopiirin saneerauksen kustannuksia on eritelty jälleenhankinta-arvo laskelmassa taulukossa 7.9. Suunnitelmassa A saneeraus on toteutettu ainoastaan vahvistamalla olemassa olevia ilmajohtorakenteita lisäämällä vanhan johtimen rinnalle toinen johdin. Suunnittelun tuloksena verkon johdinpoikkipinta-alat kasvavat kohtuuttomiksi. Muuntopiirin jaolla voidaan välttää kohtuuttoman suurien johdinpoikkipinta-alojen käyttö, kuten saneeraus-suunnitelmassa B on havainnollistettu. Kuvassa 7.21 on nähtävillä pienjänniteverkon verkkokuva ja jännitteenalenemat ennen ja jälkeen suunnittelun.



Kuva 7.21 Pienjänniteverkon jännitteenalenemat lähtötilanteessa ja saneeraussuunnitelman tilanteessa.

Suunnitelmaan on valittu 200 kVA jakelumuuntajat molemmille muuntopiireille. Molemmissa piireissä on varaa kuormituksen kasvulle 90–100 kW. Johtimien poikkipinta-ala on valittu siten että viimeisen solmupisteen jännite on standardien salliman rajan yläpuolella ja sähköturvallisuuden asettamat ehdot täyttyvät. Uudet pienjänniteverkot on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 7.9 Muuntopiirin nykyarvo alkutilanteessa ja vaihtoehtoisilla saneeraussuunnitelmissa.

	Alkutilanne		Suunnitelma A		Suunnitelma B	
	määrä	JHA [k€]	määrä	JHA [k€]	määrä	JHA [k€]
Muuntaja	100 kVA	3,5	200 kVA	6,5	2 x 200 kVA	12,9
Muuntamo	1 kpl	4,8	1 kpl	4,8	2 kpl	9,6
Σ		8,3		11,2		22,5
AMKA 16 - 25	1,1 km	14,7	1,4 km	19,0		
AMKA 35 - 50	0,4 km	5,9	0,2 km	3,0		
AMKA 70	0,6 km	9,7	0,1 km	1,5		
AMKA 120			1,7 km	35,3		
Maakapeli						
25					0,18 km	1,3
35 - 50					0,02 km	0,2
70					0,61 km	7,6
95 - 120					0,49 km	6,5
150 - 185					0,35 km	6,8
Auraus 3 k€/km					1,65 km	4,9
Haaroituskaappi					12 kpl	7,4
Σ		38,6		70,0		57,3

Saneerauksen kokonaiskustannus muodostuu pääasiassa johtimien saneerauksesta kuten edellä esitetystä saneerausesimerkkien erittelystä käy ilmi. Pienjänniteverkon suunnitteluun perustuva kokonaissaneerauskustannus on 52 k€, kun yksi olemassa oleva muuntamorakenne voidaan hyödyntää vanhasta muuntopiiristä. Ilman jakelumuuntajia ja muuntamorakenteita saneerauskustannus on 34 k€. Muuntopiirin alkuperäistä johdinmäärää kohden pienjänniteverkon saneerauskustannuksia muodostuu 17 k€/km, joka on arvioon perustuvaa kustannusta pienempi.

Jos oletetaan verkon alkutilanteen kuormituksen olevan tarkastelussa esitettyä pienempi, esimerkiksi 50 kW, on kokonaisteho sen verran pienempi, että verkko voidaan toteuttaa yhtenä muuntopiirinä järkevillä johdin poikkipinta-aloilla. Kustannuksia muodostuu näin ollen hieman suunnitelman B kustannuksia vähemmän. Muuntopiiriin riittää yksi 200 kVA muuntaja ja muutamien alkupään johtimien vahvistaminen. Johtimen vahvistaminen maksaa noin 30 k€, joten saneerauksen kokonaiskustannukset muuntajan kanssa ovat noin 36 k€. Verkon jälleenhankinta arvo olisi näin ollen suunnilleen sama kuin suunnitelman B kaapeliverkolla. Kustannuksia muodostuu verkkopituutta kohden noin 13,5 k€/km, joka on hieman vähemmän kuin suunnitelman B mukaan toteutettavan saneerauksen kustannukset.

Johdinpituuteen perustuvaa kustannusta voidaan käyttää varauksella arvioitaessa koko jakelualueen pienjänniteverkkojen saneerauskustannuksia. Arvion tarkkuus on riippuvainen pienjänniteverkkojen rakenteesta ja kuormitustilanteista, jotka ovat erilaisia ja täten saneeraustarve voi olla poikkeava. Jakeluverkon alueella on pienjänniteverkkoa yhteensä 1300 km josta noin 1100 km on ilmajohtoa. Saneerauksen kustannuksia arvioitaessa on hyvä huomioida myös, että pienjänniteverkkojen vikatiheys pienenee ja verkon jälleenhankinta-arvo kasvaa. Koska kyseessä on jakeluverkko joka sijoittuu pääasiassa harvaan asutulle maaseudulle, voidaan esittää suuntaa antava arvio verkkoalueen pienjänniteverkkojen yhteenlasketuista saneerauskustannuksista. Johdinpituuteen perustuvan saneerauskus-

tannuksen ollessa 17 k€/km on kaikkien pienjänniteverkkojen saneerauskustannus 22 M€ luokkaa. Kustannus on karkeasti arvioiden samaa suuruusluokkaa kaikkien pienjänniteverkkojen jälleenhankinta-arvon kanssa. Pienemmän kuormitustilanteen mukaan lasketulla kustannuksella 13,5 k€/km kustannuksia muodostuu noin 17 M€. Tarkemman arvion aikaan saamiseksi tarkasteltavan verkon alueen pienjänniteverkkojen rakenne ja kuormitustaso olisi tunnettava tarkemmin. Tässä työssä ei tehdä kehityssuunnitelmaa verkkoyhtiölle, joten koko verkosta ei tehdä tarkempaa arviota. Edellä esitetyt kustannukset kuitenkin antavat suuntaviivat tarvittavien investointien kustannuksista.

Jakelumuntajien jälleenhankinta-arvo on noin 2,5 M€. Aiemmin esitettiin arvio jakelumuntajien kapasiteetin kasvattamistarpeen olevan 40 MVA. Arvio perustui muntajien yhteenlasketun kapasiteetin lisäystarpeeseen. Suunnitteluun perustustuen kapasiteetin lisäystarve on suurempi, koska suunnittelussa valitaan muntajakoko saatavilla olevista muntajista siten, että muuntopiirin kuormituksen kasvulle jää vielä varaa. Arvioon perustuen koko verkon muntajakapasiteetin lisäämisen kustannukset ovat yhteensä 1,3 M€, joka on noin puolet koko muntajakapasiteetin jälleenhankinta-arvosta.

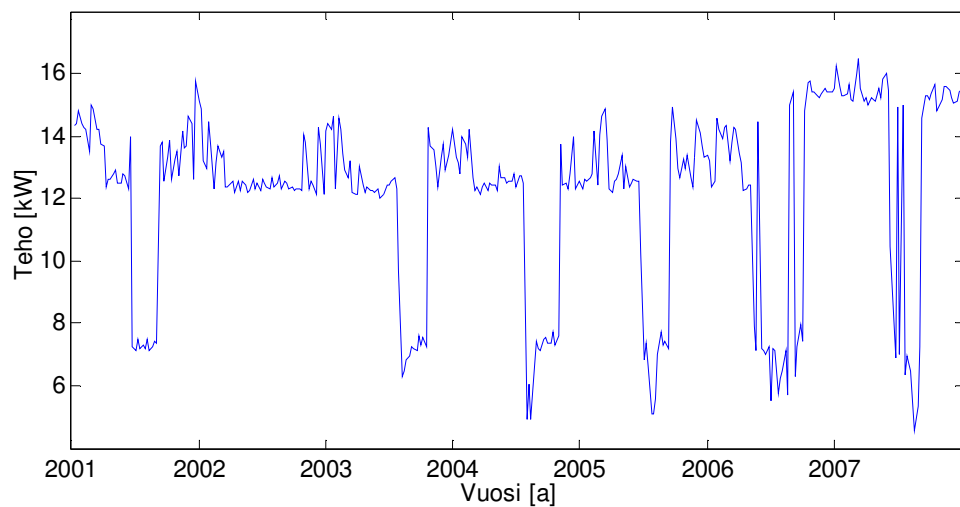
7.2.3 AMR -mittauksiin perustuva simulointi

Tämän hetkissä tutkimuksissa ei ole vielä otettu kantaa latauskuormituksen vaikutuksiin todellisten asiakkaiden kuormitustietojen pohjalta. Näin ollen on perusteltua tarkastella kuormituksen kasvua myös todellisen datan pohjalta. Olemassa olevan suomalaisen kuormitustutkimuksen data on kerätty pääasiassa 80 -luvulla (Kuormitustutkimus 1992). Asiakasryhmien kuormitus ei vastaa olemassa olevia tyyppikäyriä esimerkiksi muuttuneiden sähkönkulutustottumusten vuoksi. Vaikka kuormitus olisikin tyyppikäyriä vastaava, saadaan latauskuorman tarkasteluun silti eri näkökulma, joka voi ilmentää uusia piirteitä kuormituksessa.

Muuntopiirin datana käytetään pienasiakkaiden AMR -dataa, jota on kerätty vuodesta 2001 alkaen. Mitatuista kulutuspisteistä valitaan havainnollistamiseen erilaisten tyyppikäyräryhmien edustajia siten, että kunkin asiakkaan kuormitus

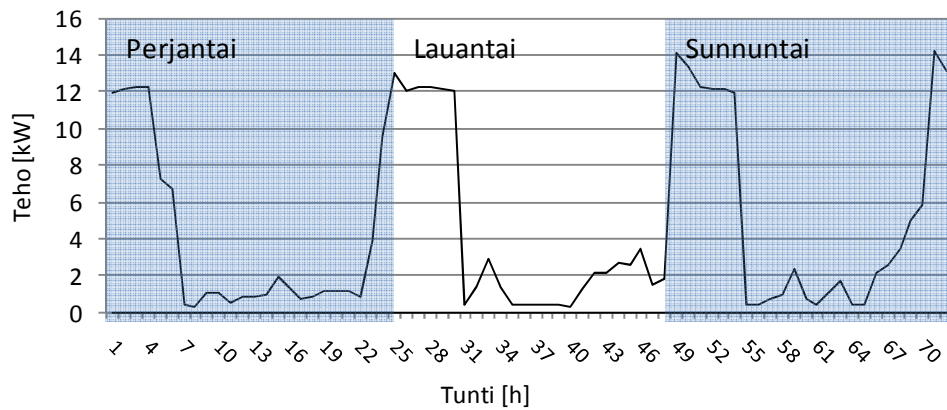
muistuttaa tyyppikäyrän mukaista kuormitusta. Valinta on tehtävä sen vuoksi, että osa kuormituskäyristä muistuttaa enemmän jotain muuta tyyppikäyrää kuin asiakkaalle on merkitty.

Kuvassa 7.22 on erään asiakkaan kuormituksen viikkohuippuarvot vuosilta 2001–2008. Kuormituksessa voidaan havaita selvästi, että kuormituksessa on melko paljon hajontaa niin vuosien välillä kuin viikkotasollakin. Lähempään tarkasteluun valitaan vuoden 2006 tammikuun huippukuormituksen aika, eli viikko 3.



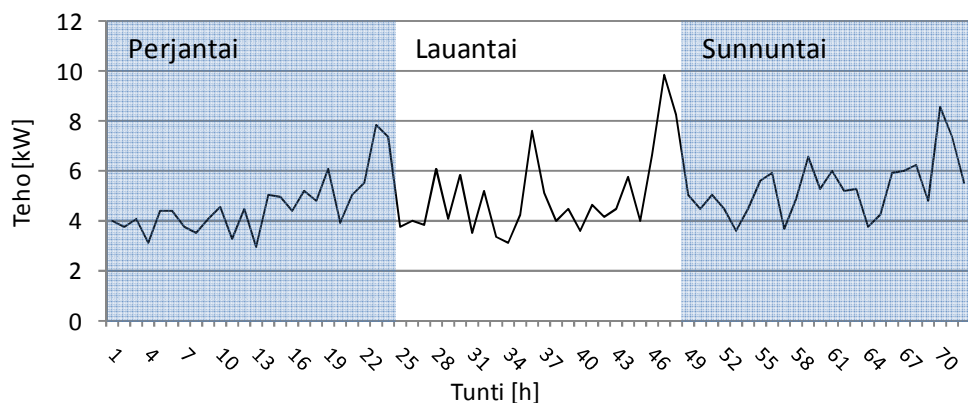
Kuva 7.22 Erään asiakkaan viikkohuipputehot vuosilta 2001–2008.

Lähempi tarkastelu paljastaa, että kyseisellä asiakkaalla on varaava sähkölämmitys, kuten kuvasta 7.23 voidaan todeta. Kuormituksen huippu ajoittuu selkeästi kello 22 jälkeen, kun varaava sähkölämmitys kytkeytyy päälle. Käyrä on hieman tyyppillisestä poikkeava, koska tehonkäyttö ei lisäänty heti kello 22 kohdalla vaan vasta hieman myöhemmin. Asiakkaiden sähkölämmitys voi olla verkonhaltijan ohjauksessa. Ohjauksen tavoitteena on kytkeä sähkölämmitykset verkkoon hieman eri aikaan. Näin verkonhaltija voi vähentää samaan aikaan kytkeytyvän kuormituksen määrää.



Kuva 7.23 Erään varaavaa sähkölämmitystä käyttävän asiakkaan tehokuvaaja tammikuun perjantaista sunnuntaihin tunneittain.

Kuvan asiakkaan peruskuormitus on hyvin pientä sähkölämmityksen aiheuttamaan kuormitukseen nähden. Kuvassa 7.24 on vastaavana ajankohtana erään suoraan sähkölämmitystä käyttävän asiakkaan kuormituskäyrä. Kuvasta voidaan havaita, että kuormitus on hyvin epäsäännöllistä toisin kuin kuvassa 7.23, jossa kuormitus on jaksottunutta. Suuret vaihtelut kuormituksessa johtuvat suoran sähkölämmityksen kytkeytymisestä päälle ja pois tarpeen mukaan. Useamman tunnin keskiarvoja tarkasteltaessa voitaisiin havaita lämmitysmuodon voimakas riippuvuus ulkolämpötilasta.

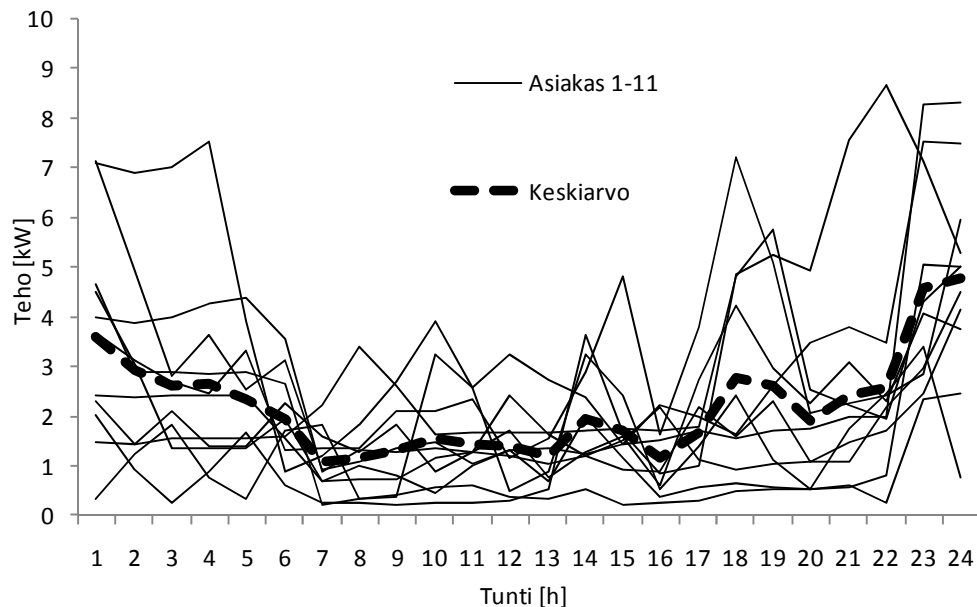


Kuva 7.24 Erään suoraan sähkölämmitystä käyttävän asiakkaan tehokuvaaja eräästä tammikuun perjantaista sunnuntaihin.

Asiakkaiden valinta muuntopiiriin

Asiakkaiden valinta on pyritty tekemään siten, että asiakkaat edustaisivat mahdollisimman hyvin tyyppikäyrän mukaista kuormitusta. Tarkastelussa on mukana 11 asiakasta joilla on osittainvaraava sähkölämmitys ja kaksi asiakasta, joilla on varaava sähkölämmitys. Tarkasteltavina päivinä ovat talviajan perjantai, lauantai ja sunnuntai.

Kuvassa 7.25 on tyyppikäyrää yksi edustavia asiakkaita samassa kuvaajassa. Kuvasta ilmenee, että asiakkaiden kuormituksissa on paljon hajontaa.



Kuva 7.25 Eräiden osittain varaavaa sähkölämmitystä käyttävien asiakkaiden tehokuvaajat eräänä tammikuun lauantaina.

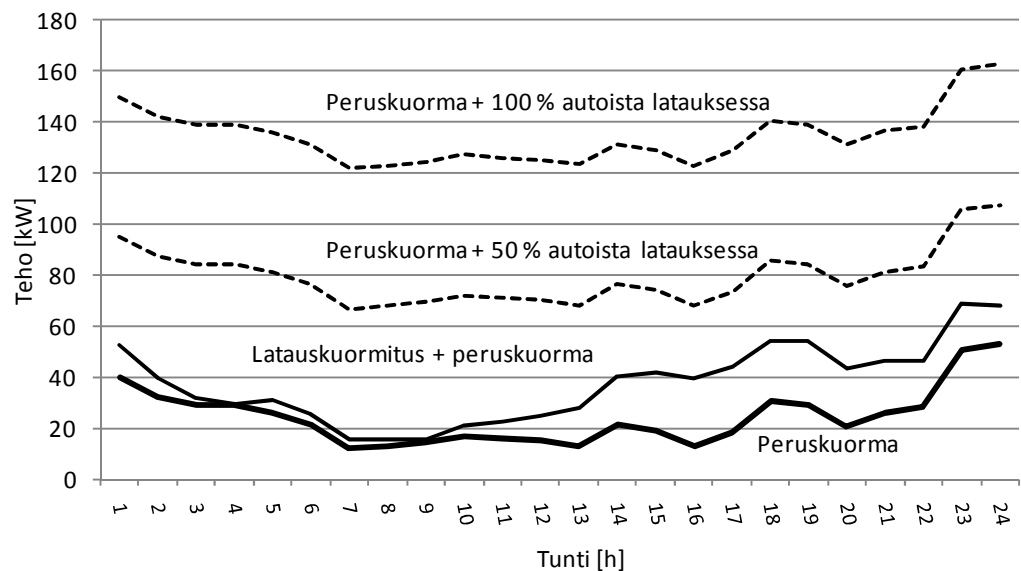
Tyypillisesti suurin huippukuorman ajoittuu lauantai-iltaan. Sähköauton latauskuormana käytetään kappaleessa 7.1.4 esitettyä dataa.

Lataus muuntopiirissä

Esimerkissä käsitellään olettamusta, että muuntopiirin alueella jokaiselle taloudella olisi yksi sähköauto. Sähköauton lataus perustuu henkilöliikennetutkimuksen pohjalta tehtyyn arvioon auton latausprofiilista. Tarkastelun on tarkoitus an-

taa käsitys miten paljon verkon olisi kestettävä kuormaa äärimmäisessä tilanteessa ja miten kuormituksen kasvuun voidaan varautua.

Kuvassa 7.26 on esitetty 11 osittain varaavaa sähkölämmitystä käyttävän kotitalouden ryhmän summateho eräänä talvilauantaina. Kuvasta on selvästi havaittavissa, että kuormituksessa on piikit kello 18 ja kello 22 kohdalla. Sähköautojen latauksen kannalta pohjakuormituksen muoto ei ole erityisen edullinen, koska sähköautojen latauksen oletetaan ajoittuvan pääasiassa illalle. Koska kyseessä on lauantai, on sähköauton latauskuorma siirtynyt hieman aikaisemmaksi verrattuna tavalliseen arkipäivään.



Kuva 7.26 Latauksen vaikutus 11 asiakkaan muuntopiirin huipputehoon. Latauskuorma perustuu henkilöliikennetutkimuksen aineistoon.

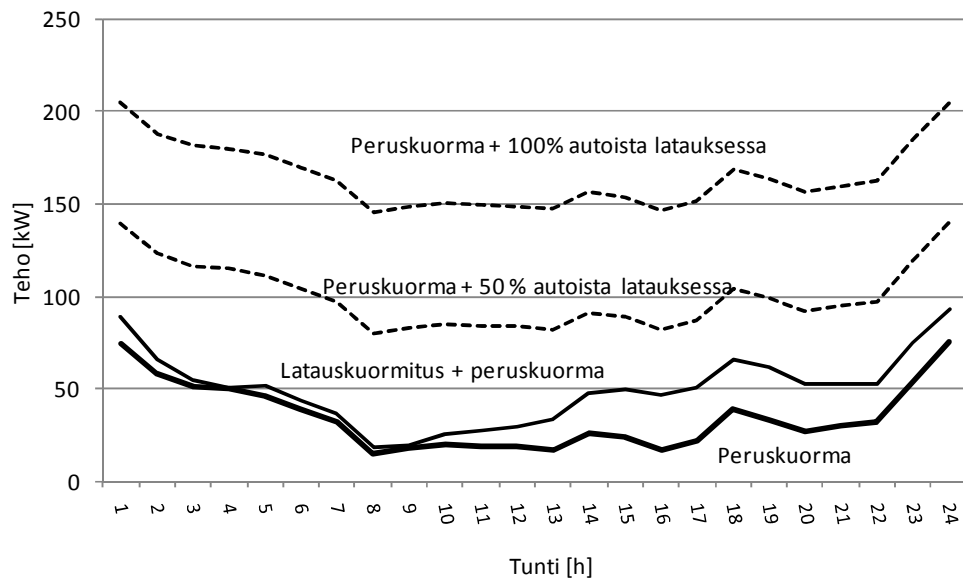
Kuvassa 7.24 on esitetty myös sähköautojen latauskuorma lisättynä peruskuormitukseen. Latauskuormassa on huomioitu hajonnan vaikutus ylitystodennäköisyydellä 5 %. Hajonta ja latauksen kuormituskäyrä on esitetty kappaleessa 7.1.4.

Kuvasta voidaan havaita, että sähköautojen latausteho on suurimmillaan vain alle 30 kW. Käytännössä tämä tarkoittaa, että verkossa oli yhtä aikaa vain kolme autoa latauksessa, oletuksella, että yhden auton verkosta ottama latausteho olisi 10 kW. Latauskuorman luonteen vuoksi tulokseen on syytä suhtautua varauksel-

la, koska sähköauton latauskuorma on luonteeltaan hyvin poikkeavaa kotitalouden muuhun kuormitukseen verrattuna. Latauskuormitus voi kuormittaa verkkoa vain hyvin lyhyen ajan kerralla, tai olla verkossa usean tunnin ajan. Esitetyssä esimerkissä latauskuormaa on käsitelty samoin kuin kotitalouden peruskuormitusta. Suurella joukolla latauksen huipputeho voi olla hyvinkin lähellä laskettua, mutta pienellä asiakasmäärällä tulokset voivat olla harhaanjohtavia. Latauskuorman huipun ennustaminen pienillä asiakasmäärillä vaatii lisää tutkimusta, jotta verkkojen mitoitus voidaan tehdä järkevästi. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan kuormitusta olemassa olevien oletusten perusteella.

Asiakkaiden vuorokausirytmien ollessa lähellä toisiaan päällekkäisyyden esiintymiseen on syytä varautua, koska suhteellinen kuormitus kasvaa todella paljon jokaista uutta päällekkäistä lataajaa kohden. Kuvaan on piirretty teoreettinen latauskuormitus, jossa 50 % asiakkaista lataisi autoja yhtä aikaa. Summateho kasvaa tässä tapauksessa yli 50 kW, joka vastaa suunnilleen lauantai-illan peruskuorman suuruutta. Muuntopiirissä aika tämän kaltaisen tilanteen tapahtumiselle on kello 15–20 välinen aika. Kokonaiskuormitus olisi näin olleen 80–90 kW luokkaa ja lähtötilanteen 20–30 kW kuormitukseen verrattuna kasvua olisi 300 %. Peruskuorman 50 kW huippuun nähden kasvu olisi 30–40 kW.

Tarkastelua voidaan laajentaa lisäämällä mukaan muutamia asiakkaita joiden lämmitysmuoto on varaava sähkölämmitys. Näin tekemällä pelkkä peruskuorma aiheuttaa muuntopiirille suuremmat mitoitus ehdot kello 22 kohdalle muodostuvan kulutushuipun vuoksi. Kuvassa 7.27 on esitetty tilanne jossa peruskuormana on 11 osittain varaavan sähkölämmitystalouden ja kahden varaavan sähkölämmitystalouden summateho.



Kuva 7.27 Latauksen vaikutus 13 asiakkaan muuntopiirin huipputehoon. Latauskuorma perustuu henkilöliikennetutkimuksen aineistoon.

Kuvasta 7.25 havaitaan merkittävä tehonkasvu iltatunneille kello 22 jälkeen, jolloin varaava sähkölämmitys kytkeytyy päälle. Verrattaessa tapausta tilanteeseen jossa 50 % autoista on latauksessa samaan aikaan, kuormituksen kasvu peruskuorman huippuun 75 kW nähden on luokkaa 35 kW tunteja 15–20 tarkasteltaessa. Suhteellinen kuorman kasvu olisi tässä tapauksessa noin 45 %. Verkon valmius sähköautojen pikalataukseen olisi parempi kuormituksen luonteen vuoksi, mutta vain jos latauskuorma voidaan ajoittaa ajalle ennen kello 22.

Tarkastelussa voidaan olettaa, että yhteensä 13 asiakkaan pienellä muuntopiirillä olisi 100 kVA jakelumuuntaja. Muuntajan kapasiteetti voisi riittää tilanteessa jossa 50 % asiakkaista lataa autoa samanaikaisesti. On kuitenkin syytä muistaa, että myös tilanne jossa autoja on latauksessa enemmän kuin 50 % on mahdollinen.

Tarkastelu antaa hyvän kuvan tilanteen luonteesta pienessä muuntopiirissä. Autojen lataus luo paineita verkon kehittämiseen tai latausautomaation lisäämiseen. Latauskuormaa ei välttämättä tarvitse käsitellä edellä esitetyllä tavalla vaan lataukseen voidaan lisätä ohjaus, joka rajoittaa kuorman suuruutta tai optimoi latauksen ajoitusta muun kuormituksen suhteen. Optimointi voi myös suorittaa mo-

lempia tehtäviä samanaikaisesti. Optimoinnin suunnittelussa on kuitenkin huomioitava ihmisten tarpeet ja latauksen sujuvuus on varmistettava sopivin ehdoin.

7.2.4 Pienjänniteverkon verkkovaikutusten yhteenveto

Edellisten kappaleiden tulosten perustella voidaan sanoa, että pienjänniteverkkojen ylläpito on haasteellista kuormituksen kasvaessa simuloitulla tavalla. Sähköautojen levinneisyysasteella 25 % aiheutuu merkittäviä verkkovaikutuksia taajamien muuntopiireille, jossa on paljon asiakkaita yhdessä muuntopiirissä. Haja-asutusalueen muuntopiirit joiden asiakasmäärä on pieni, selviävät pienestä kuormituksen kasvusta vähemmällä verkkovaikutuksilla.

Simulointi osoittaa sähköautojen levinneisyysasteen lisääntyessä 50 % myös tarkastellun haja-asutusalueen pienjänniteverkon kuormituksen kasvaneen liian paljon jotta käyttöä voitaisiin jatkaa ilman saneerausta.

AMR -dataan perustuvan muuntopiirin tarkastelu tuotti samankaltaisia tuloksia kuin VTJ:llä simuloitut pienjänniteverkot. Sähköauton latausprofiili on sen tyyppinen, että pienjänniteverkkojen huipputehot kasvavat merkittävästi luoden paineen pienjänniteverkkojen saneeraukselle.

Pienjänniteverkon saneerauskustannukset ovat hyvin riippuvaisia verkon rakenteesta ja verkon alkuperäisestä kuormitustilanteesta. Pienjänniteverkon saneerauksen kustannuksia on vaikea arvioida koko jakelualueen laajuudella tarkastelematta jokaista muuntopiiriä erikseen tai luokittelematta muuntopiirejä tilan ja ominaisuuksien avulla. Taajaman 260 asiakkaan muuntopiirin saneerauskustannukset 50 % sähköautojen levinneisyysasteella ovat 339 k€ ja haja-asutusalueen 16 asiakkaan muuntopiirin 64 k€. Rakennettua kapasiteettia kohden kustannus on pienempi taajamassa kuin haja-asutusalueella. Myös asiakaskohtainen kustannus on pienempi taajamassa kuin haja-asutusalueella. Pienjänniteverkkojen saneerauskustannukset ovat lähellä olemassa olevien pienjänniteverkkojen nykyarvoja.

8 Johtopäätökset

Tässä kappaleessa kerätään yhteen tärkeimmät havainnot ja esitetään havaintojen pohjalta tehdyt johtopäätökset ja perustelut. Myös tulosten oikeellisuutta ja mahdollisia virhetekijöitä arvioidaan. Samalla arvioidaan jatkotarkastelun tarvetta.

Akkutekniikan kehitys on tärkeä osa sähköautojen yleistymisen tarkastelun kannalta. Akkujen nykyistä kehitystilaa voidaan pitää riittävänä sähköautojen kapasiteetti ja tehontarvetta ajatellen. On kuitenkin huomioitava, että akkujen energiatiheys ei kuitenkaan ole lähelläkään nestemäisten polttoaineiden energiasisältöä. Tulevaisuudessa akkujen energiatiheys ja tehotehiys kasvavat sekä hinta laskee. Hinnanlaskun ja ominaisuuksien parantumisen myötä myös sähköauton kilpailukyky parantuu hybridiäutoa ja polttomoottoriautoa vastaan.

Toisaalta voidaan todeta myös, että akuissa on vielä paljon kehityspotentiaalia, vaikka akut ovatkin jo varsin kehittyneitä. Suurin ongelma autojen yleistymisen esteenä on sähköautojen rajallinen toimintasäde. Ladattavalla hybridiäutolla vastaavaa ongelmaa ei ole. Hybridiäuton tekniikka on kuitenkin monimutkaisempaa, joten auton hankitakustannus ja käyttö voi olla kalliimpaa.

Sähköautojen pikalataus on mahdollista toteuttaa nykyisellä akkutekniikalla kohtuullisella tuntien luokkaa olevalla latauksen kestolla. Akkujen eliniän lyheneminen pikalatauksen seurauksena on kuitenkin väistämätöntä. Pikalatauksen toteuttaminen omakotitalojen kiinteistöverkkojen kannalta on mahdollista useimmissa tapauksissa kolmivaiheisena noin 10 kW teholla. Latauksen seurauksena kiinteistöjen kuormaa voidaan joutua vuorottelemaan pääsulakkeen koosta riippuen. Rivitalojen ja omakotitalojen kiinteistöverkkojen mitoitus on useissa tapauksissa riittämätön sähköautojen pikalatauksen kannalta. Hidas lataus voi olla mahdollinen pienellä levinneisyysasteella.

Jakeluverkolla tehty simulointi osoittaa, että sähköautojen latauksen aiheuttamat verkkovaikutukset ovat suoralla latauksella merkittäviä. Vaikutuksia aiheutuu keskijänniteverkolle, jakelumuuntajille ja pienjänniteverkoille. Suurin haaste on taajamamuuntopiirien kestävyys sähköautojen laajamittaisen yleistymisen yhteydessä. Simulointi osoittaa, että pienellä levinneisyysasteella latauskuorma ei aiheita ongelmia keskijänniteverkon toiminnalle, mutta jakelumuuntajille ja pienjänniteverkoille on tehtävä saneeraustoimenpiteitä käytön jatkamiseksi. Sähköautojen levinneisyysasteen kasvaessa 50 % kasvaa kuormitus niin paljon, että keskijänniteverkkoakin on saneerattava. Keskijänniteverkon huipputeho nousee jopa yli 90 % ja pienjänniteverkkojen huipputehot noin 100 %. Taulukkoon 8.1 on koostettu yhteenveto eri verkonosien kustannusarvoista.

Taulukko 8.1 Verkon saneerauskustannukset sähköautojen 50 % levinneisyysasteella.

Keskijänniteverkko		9,6 M€
Jakelumuuntajat		1,3 M€
Pienjänniteverkko	taajama	40-50 k€/km
	maaseutu	10-20 k€/km

Pienjänniteverkkojen kokonaissaneerauskustannus on luokkaa 20 M€, joka vastaa jo koko olemassa olevan pienjänniteverkon jälleenhankinta arvoa. Koko tarkasteltavan verkon jälleenhankinta arvo on noin 50 M€, joten saneerauskustannukset ovat yhteensä 60 % jälleenhankinta arvosta.

Kustannusarvioita on syytä tarkastella harkiten, koska arviot perustuvat vai yhden verkon ja tietyn kuormitustilanteen arviointiin. Myös kuormituksen mallintaminen vaatii lisää tutkimusta, jotta kuorman todellinen suuruus voidaan sanoa hyvällä varmuudella. Tässä työssä esitetyn tarkastelun pohjalta voidaan kuitenkin todeta, että sähköautojen pikalatauksen aiheuttaman kuormituksen suuruus on niin suuri, että se aiheuttaa verkon vahvistustoimenpiteitä. Kuormituksen suuruuteen voidaan kuitenkin vaikuttaa kuorman ohjauksella. Tässä työssä esitetyn tarkastelun pohjalta ei kuitenkaan voida sanoa, kuinka paljon kuormituksen huippua voidaan pienentää ohjauksella. Aihe vaatii lisäselvityksiä, joissa huomioidaan myös ihmisten käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä.

9 Yhteenveto

Tässä diplomityössä on käsitelty sähköautojen pikalatausta ja latauksen aiheuttamia vaikutuksia sähköverkolle. Tarkastelu on tarpeen, koska sähköautojen määrä ja sähköautojen latauspisteiden määrä on lisääntymässä. Tässä työssä tarkastelun pääpaino keskittyy sähköautojen pikalataukseen kotitalouksissa. Seuraavissa kappaleissa kerrataan lyhyesti työn sisältö.

Toinen luku antaa kokonaiskuvan sähköautoista ja sähköautojen kehityksestä viimeisten vuosikymmenien aikana, sekä esittää arvioin sähköautojen yleistymisestä. Sähköautojen yleistyminen riippuu monesta tekijästä, kuten autojen saatavuudesta, autojen valmistajista ja veroratkaisuista. Eräs merkittävä tekijä autojen yleistymisen kannalta on akkuteknologian kehitys.

Kolmas luku käsittelee akkuteknologiaa ja akkujen kehitystä. Akkujen tunteminen on yksi tärkeimmistä tekijöistä autojen lataamisen kannalta, koska akut asettavat reunaehdoja latauksen toteuttamiselle. Akkujen rakenne rajoittaa latausnopeuden ja autoon mahtuva kapasiteetti latauksen määrän. Akkukapasiteetin määrään vaikuttaa myös akkujen hinta, koska sähköauton on oltava houkutteleva vaihtoehto myös kustannusten puolesta, jotta sähköautot alkaisivat yleistyä.

Neljännessä luvussa käsitellään autonkäyttöä ja luodaan edellytykset simuloinnille. Auton käytön tarkastelun pohjana toimii henkilöliikennetutkimus, jossa on seurattu suomalaisten liikkumista laajalla otoksella. Data luo hyvän pohjan henkilöauton käytön ennustamiselle ja täten latauskuorman mallintamiselle. Aineiston käsittely vaatii lisää tutkimusta myös tämän työn ulkopuolella.

Viidennessä luvussa käsitellään lataustekniikkaa ja luokitellaan erilaiset lataustyytit. Lisäksi tarkastellaan latauksen toteuttamisen mahdollisuuksia erilaisissa kohteissa.

Kuudennessa luvussa esitetään simulointimenetelmät. Sähköautojen pikalatausta simuloidaan pääasiassa verkkotietojärjestelmällä kuormitusmalleja muokkaamalla, mutta myös muita mahdollisuuksia pohditaan.

Seitsemännessä luvussa käsitellään simulointia ja simuloinnin tuloksia. Keski-jänniteverkon simulointi osoittaa verkon selviävän hyvin pienestä sähköautojen pikalatauksen määrästä, mutta suurempi määrä latausta aiheuttaa saneeraus-painetta. Pienjänniteverkon tapauksessa verkkovaikutukset näkyvät nopeammin ja aiheuttavat verkoille tilan, jossa käyttöä ei voida jatkaa.

Johtopäätöksenä todetaan, että sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset ovat merkittäviä ja, että kuorman ohjauksen mahdollisuutta kannattaa tutkia, jotta voidaan välttää simuloinnin kaltainen kuormitustilanne. Myös kuorman mallintamista on syytä tutkia lisää, koska kuormituksen luonne poikkeaa niin paljon tyypillisestä kotitalouskuormasta.

Lähdeluettelo

- CHAdEMo 2010 CHAdEMO Association, Diserable charasterics of public quick charger, 2010, Tokyo,
http://www.emc-mec.ca/phev/Presentations_en/S12/PHEV09-S12-3_TakafumiAnegawa.pdf
- A123 2010 A123, tuote-esite "Power Lithium Ion ANR26650M1A", viitattu:15.9.2010, saatavilla:
http://www.a123systems.com/cms/product/pdf/1/_ANR26650M1A.pdf
- Alatalo 2010 Alatalo Martti, European Batteries, Sähköautotyöpaja seminaariesitys VTT, 24.5.2010
- Better Place 2010 Better Place, <http://www.betterplace.com/>, viitattu 11.10.2010
- Chevrolet 2010 Chevrolet, 2010, saatavilla:
<http://www.chevrolet.com/pages/open/default/future/volt.do>, viitattu 27.9.2010
- Draka 2010 Draka verkkosivu, viitattu 6.9.2010, saatavilla:
http://www.draka.fi/draka/Countries/Draka_Finland/Languages/suomi/navigaatio/Tuotteet/Kiinteistoverkot/Voimakaaapelit/Keskijannitekaapelit/index.jsp
- Ehsani et al. 2010 Ehsani M., Gao Y., Emadi A., 2010, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Second Edition, Taylor and Francis Group, Boca Raton Florida USA, 534 p.

EMV 2010	Energiamarkkinavirasto, Sähkön hinnan kehitys 1.6.2010, viitattu 20.8.2010, saatavilla: http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1931&pgid=67
EMV 2010,a	Energiamarkkinavirasto, Sähkönjakeluverkon komponenttien yksikköhinnat vuodelle 2010, vii- tattu 2.9.2010 saatavilla: http://www.emvi.fi/files/Sahkoverkkokomponentti en_yksikkohintataulukko_2010.xls
EU 2010	Euroopan unionin portaali - politiikan alat, viitattu 8.4.2010, http://europa.eu/pol/index_fi.htm
EUBusiness 2010	Eubusiness, Europe wants unified system for re- charging electric cars in 2011, 26.5.2010, saatavilla: Europe wants unified system for recharging elec- tric cars in 2011, viitattu 11.10.2010
European Batteries 2010	European Batteries, Esite, saatavilla: http://www.europeanbatteries.com/content/downlo ad/272/1900/file/EB_brochure.pdf , viitattu 21.6.2010
Fulton 2009	Fulton Lew, IEA/SPT, Environmentalaly Friendly Vehicles 2009, New Delhi, 24.11.2009,viitattu 9.9.2010, saatavilla: http://www.50by50campaign.org/Documents/Upd ates/Fulton-talk-for-EFV-24-Nov.pdf

- Getf et al. 2010 Geth F., Willekens K., Clement K., Driesen J., De Breucker, S., "Impact-analysis of the charging of plug-in hybrid vehicles on the production park in Belgium," *MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference* , vol., no., pp.425-430, 26-28 April 2010, doi: 10.1109/MELCON.2010.5476243
- Gonzales et al. 1996 Gonzalez M., Perez M.A., Diaz J., Ferrero F.J., "Ni-Cd and Ni-MH battery optimized fast-charge method for portable telecommunication applications," *Telecommunications Energy Conference, 1996. INTELEC '96., 18th International* , vol., no., pp.522-529, 6-10 Oct 1996, doi: 10.1109/INTLEC.1996.573385
- Henkilöliikennetutkimus 2006 Henkilöliikennetutkimus 2004-2005, 2006, WSP LP-Konsultit Oy, Liikenne- ja viestintäministeriö, Tiehallinto ja Ratahallintokeskus, Dark Oy, ISBN 951-803-682-9
- Ipakchi et al. 2009 Ipakchi A., Albuyeh F., "Grid of the future," *Power and Energy Magazine, IEEE* , vol.7, no.2, pp.52-62, March-April 2009, doi: 10.1109/MPE.2008.931384, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4787536&isnumber=4787510>
- Kuormitustutkimus 1992 Sähkön käytön kuormitustutkimus 1992, Julkaisusarja 5/92, Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y., Helsinki, 1992

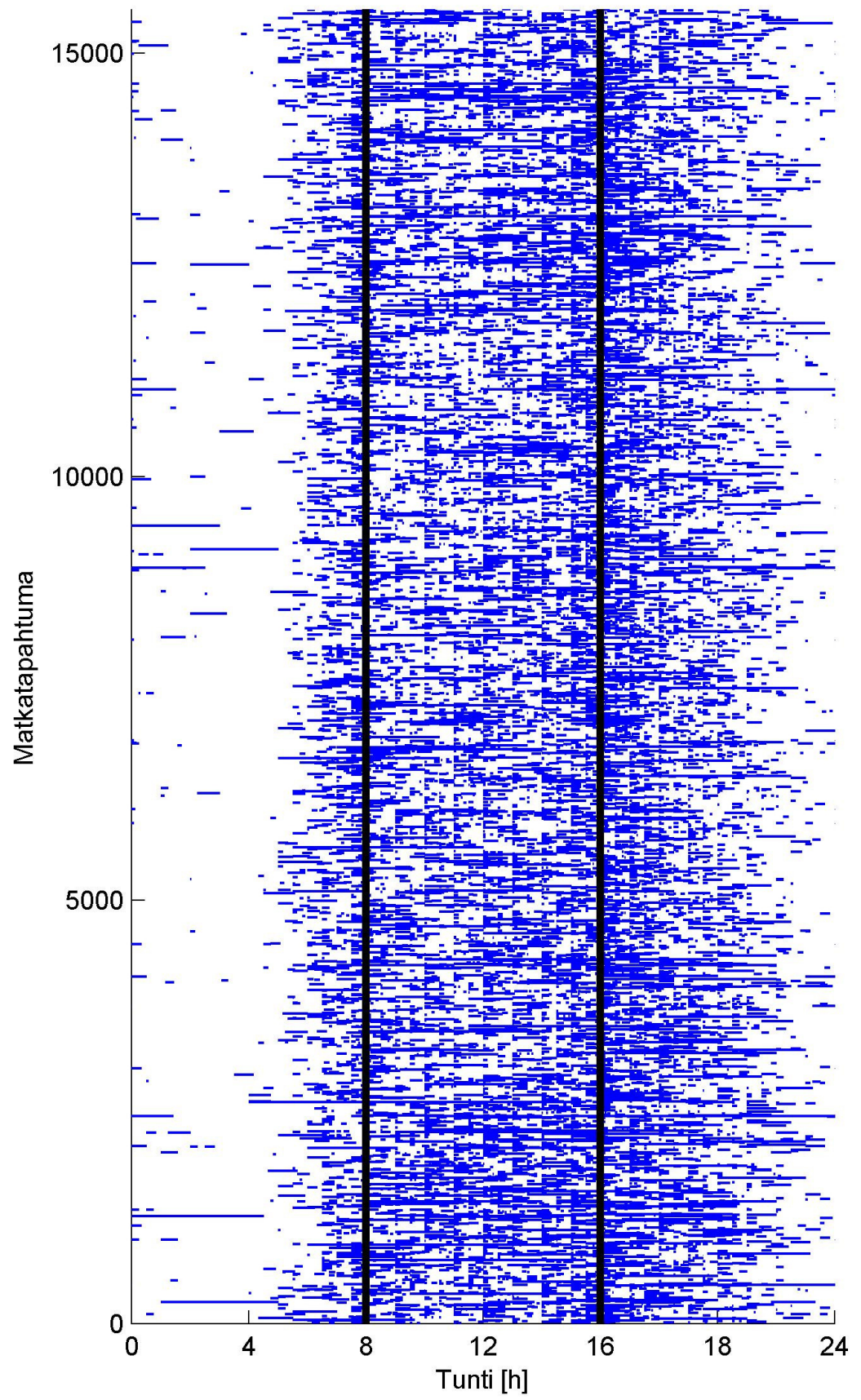
- Lakervi & Partanen 2008 Lakervi E., Partanen, J., Sähköjaketekniikka, Helsinki, Gaudeamus Helsinki University Press, 2008, 285 s., ISBN 978-951-672-357-3
- Larminie & Lowry 2003 Larminie J. Lowry J., 2003, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, saatavilla:
http://knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2117&VerticalID=0
- Lassila 2009 Lassila J., Kaipia T., Haakana J., Järventausta P., Rautiainen A., Marttila M., ja Auvinen O., 2009. "Electric Cars - Challenge or Opportunity for the Electricity Distribution Infrastructure?", European Conference: Smart Grids and Mobility. Würzburg, Germany
- Motiva 2009 Motivan verkkosivu, Liityntäpysäköinti, 30.9.2009, http://www.motiva.fi/liikenne/jarkeva_autoilu/liityntapysakointi, viitattu 18.8.2010
- Nelson & Bolin 1995 Nelson J.P., Bolin W.D., "Basics and advances in battery systems," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.31, no.2, pp.419-428, Mar/Apr 1995, doi: 10.1109/28.370294

- Nissan 2010 Nissan, 2010, saatavilla:
<http://www.nissanusa.com/leaf-electric-car/>, viitattu 27.9.2010
- Nord Pool 2010 Nord Pool Spot verkkosivu,
<http://www.nordpoolspot.com/>, 2010, viitattu 13.7.2010
- Piense 2010 Piense E. F., THINK Global AS Norway, Grid connected vehicles Capabilities and characteristics, kurssi: Electric Vehicle Integration into Modern Power Network, 23.9.2010, DTU, Taska
- Rautiainen et al. 2010 Rautiainen A., Repo S., Järventausta P., Mutanen A., 2010, Statistical charging load modelling of PHEVs in electricity distribution networks using National Travel Survey data, Tampere University of Technology, Tampere
- SAE 2010 SAE International,
<http://www.sae.org/mags/AEI/7479>, viitattu 15.4.2010
- Salameh 2009 Salameh Z.M., Kim B.G., "Advanced lithium polymer batteries," *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE* , vol., no., pp.1-5, 26-30 July 2009, doi: 10.1109/PES.2009.5275404, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5275404&isnumber=5260217>

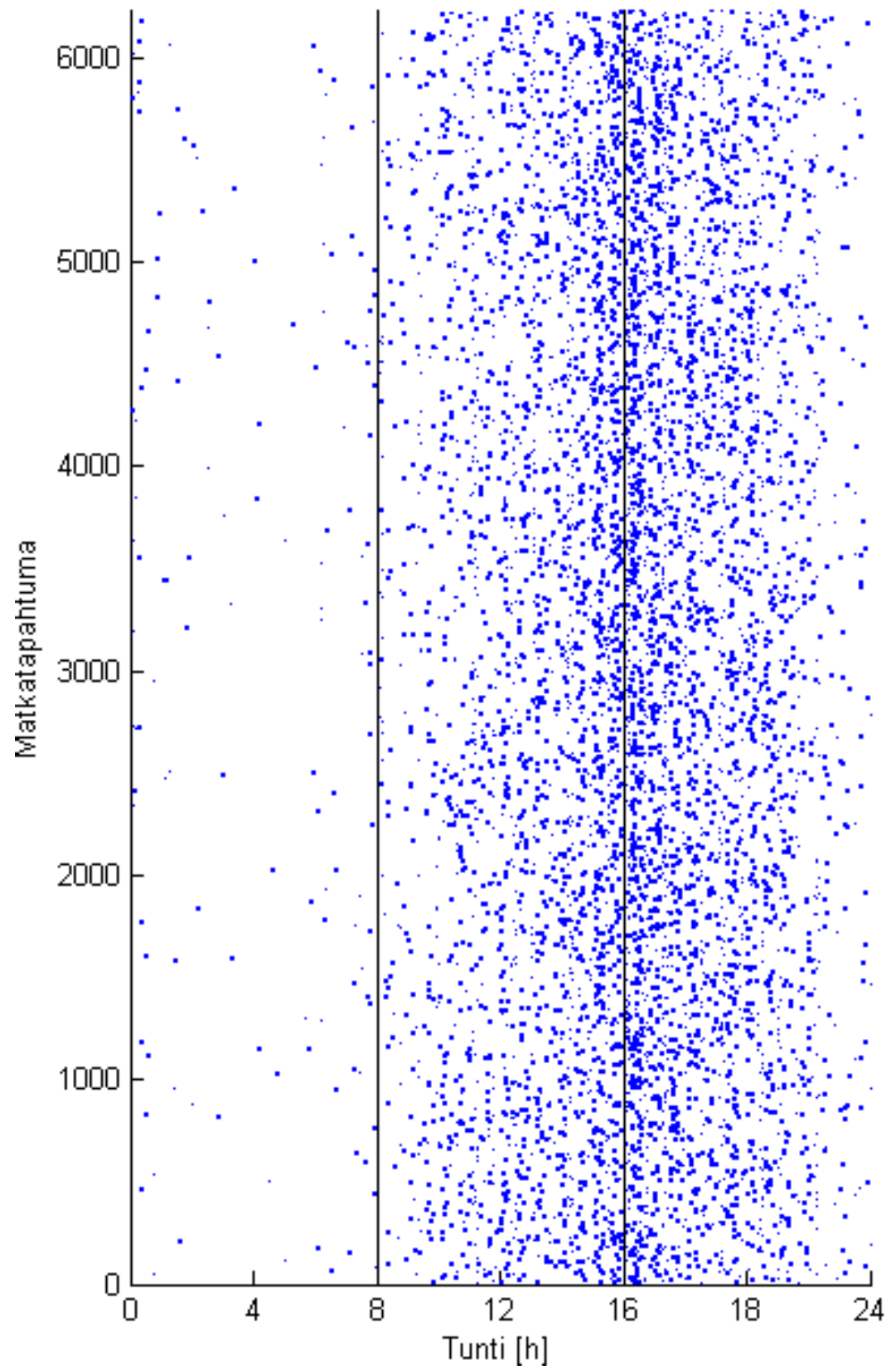
- Soares 2010 Joel Soares, kurssi: Electric Vehicle Integration into Modern Power Network, 23.9.2010, DTU, Taska
- Technology Review 2010 Technology Review, MIT,
<http://www.technologyreview.com/Energy/18910/?a=f>, viitattu 21.4.2010
- Think 2010 Think, THINK announces new sales operation in Finland with production partner Valmet Automotive, lehdistötiedote, 10.9.2010, saatavilla:
<http://www.thinkev.com/Press/Press-releases/THINK-announces-new-sales-operation-in-Finland-with-production-partner-Valmet-Automotive>, viitattu 27.9.2010
- Tilastokeskus 2010 Tilastokeskus, Kasvihuonekaasut 2008,
<http://www.tilastokeskus.fi>, viitattu 20.4.2010
- Tilastokeskus 2010,a Tilastokeskus, Moottoriajoneuvokanta 2009,
<http://www.tilastokeskus.fi>, viitattu 25.5.2010
- Tilastokeskus 2010,b Tilastokeskus, Kotitalouksien määrä ja keskikoko Suomessa 1966-2006,
http://www.stat.fi/til/ktutk/2006/ktutk_2006_2008-08-11_tau_009.html
- Toshiba 2010 Toshiba, saatavilla:
http://www.toshiba.com/ind/product_display.jsp?id1=821, viitattu 7.6.2010

- Toyota 2010 Toyota, Prius, saatavilla:
http://www.toyota.com/about/our_business/our_history/product_history/pdf/prius.pdf, viitattu 27.9.2010
- VTT 2010 VTT EV Passat -sähköauton latauksen mittausdata, VTT, 2010
- VVO 2009 VVO VUSU 2009, saatavilla:
<http://www.vvo.fi/attachements/2009-09-29T15-48-2938.pdf>, viitattu 17.8.2010

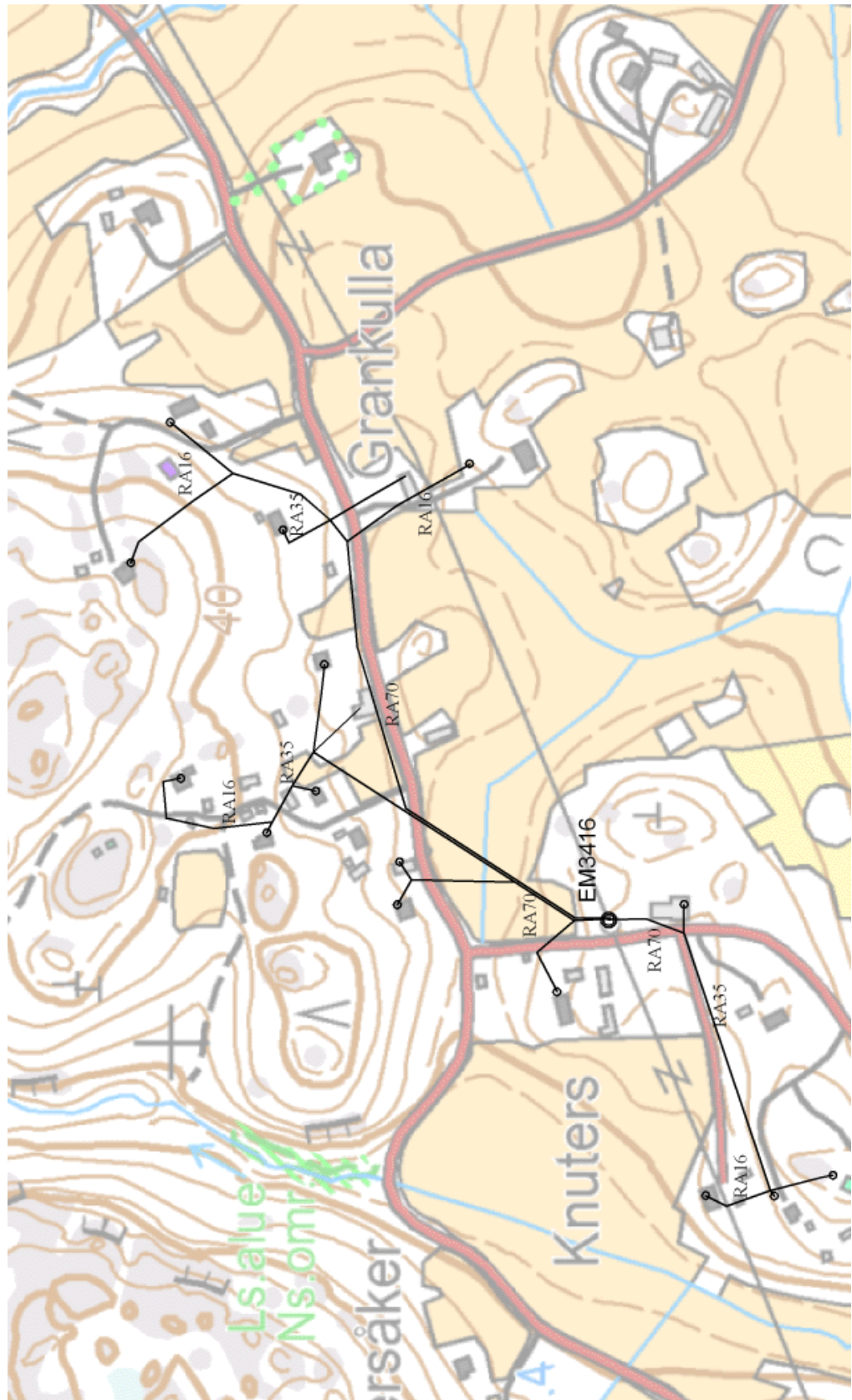
Liite 1: Henkilöautonkuljettajan matka-ajat



Liite 2: Henkilöautonkuljettajan matkan päättymisaika matkoilla kotiin



Liite 3: Pienjänniteverkko ennen saneerausta



Liite 4: Pienjänniteverkko saneerauksen jälkeen

