



**SÄHKÖISEN AJONEUVOKANNAN KASVUN AIHEUTTAMAN HUIPPUTEHON-  
SIIRRON TARPEEN MUUTOS LAPPEENRANNAN ENERGIAVERKOT OY:N  
PIENJÄNNITEJAKELUVERKOSSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Tuukka Leinonen

Tarkastajat: DI Ville Tikka

DI Petri Tikka

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Tuukka Leinonen

### **SÄHKÖISEN AJONEUVOKANNAN KASVUN AIHEUTTAMAN HUIPPU-TEHON-SIIRRON TARPEEN MUUTOS LAPPEENRANNAN ENERGIAVERKOT OY:N PIENJÄNNITEJAKELUVERKOSSA**

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

33 sivua, 11 kuvaa, 3 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastajat: DI Ville Tikka ja DI Petri Tikka

Avainsanat: sähkönjakeluverkko, sähköauto, sähköautojen lataus

Liikenteen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen seurauksena autovalmistajat tavoittelevat pienempipäästöisten autojen tuotantoa. Viime aikoina ladattavat sähköautot ovat yleistyneet voimakkaasti, minkä seurauksena on herännyt kysymyksiä sähkönjakeluverkkojen kantokyvystä sähköisen liikenteen korvatesa perinteistä autokantaa entistä enemmän.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on muodostaa arvio kahden tarkasteltavan muuntopiirin alueella ilmenevistä kuormituksista pienjännitejohtolähdöissä sekä jakelumuuntajissa. Tarkoituksena on selvittää, riittääkö nykyisten tehonsiirtokapasiteetin kannalta oleellisimpien verkkokomponenttien tehonsiirtokyky tarkasteltavilla kohteilla koko ajoneuvokannan muuttumisen täysin ladattaviksi sähköautoiksi.

Työn tavoitteeseen pääsemiseksi on tarkoituksena muodostaa johtolähtö- sekä muuntajakohdaiset lataustehotuntisarjat. Lataustehotuntisarjat summataan vuoden 2020 tuntikohtaisen pohjakuorman päälle. Lataustehojen ja pohjakuormien summien avulla voidaan tarkastella verkkokomponenttien tehonsiirtokapasiteetin riittävyttä ajoneuvokannan sähköistymisen jälkeen. Lisäksi lataustehojen ja pohjakuormien summien avulla voidaan tarkastella kuormitusten muutoksia sekä pysyvyysskäyriä, joiden avulla pystytään tulkitsemaan, onko tehonsiirtokapasiteetti mahdollisesti ylitetty ja jos on, niin kuinka kauan kapasiteetti tietyllä tarkastelujaksolla ylittää sallitun kapasiteetin arvon.

Työn tulosten perusteella vuoden suurimmat kuormitukset sekä muuntajilla että johtolähdöillä pysyvät sallituissa rajoissa. Jakelumuuntajien kuormitukset kuitenkin ovat ajoittain melko lähellä muuntajien nimellistehoja, jolloin ei jää kapasiteettia tehonsiirron kasvulle. Näin ollen tarkasteltavien kohteiden tehonsiirtokapasiteetin riittäessä alueiden lataustehon siirtotarpeen kasvulle, ei ole akuuttia tarvetta kapasiteetin lisäämiselle tehonsiirtokapasiteetin riittävyden näkökulmasta.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Tuukka Leinonen

### **THE IMPACT OF EV CHARGING ON LAPPEENRANNAN ENERGIAVERKOT OY'S LOW VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS AVAILABLE CAPACITY**

Bachelor's thesis

2022

33 pages, 11 figures, 3 tables and 0 appendices

Examiners: M.Sc. Ville Tikka and M.Sc. Petri Tikka

**Keywords:** electricity distribution network, electric vehicle, EV charging

Increased concern on transportations greenhouse gas emissions is driving car manufacturing companies to manufacture lower emissions cars. Recently, chargeable electric cars or EVs have become more common, which has caused questions about the capability of the electricity distribution network to transfer the increasing peak power demand.

The objective of this bachelor's thesis is to form an indicative estimate for loads occurring in low voltage customer nodes and in distribution transformers in area of two transformer circuits under consideration. The aim of this study is to investigate if existing components relevant to power distribution capacity are capable of transferring the load caused by EV charging when the whole fleet of vehicles in the case area has been replaced by Evs.

To achieve the main objective of the thesis, aim is to form an hourly charging power data series that appear in the low voltage customer nodes and in the distribution transformers. The hourly charging power data series are summed over the 2020 base loads to form an hourly data series of the total loads. With these newly formed total loads and 2020 base loads, it can be estimated if the present components of the power distribution system are capable of transferring the increased peak power demand.

Based on the results of the work, the annual maximum loads of both distribution transformers and line outputs remain within the permissible limits. However, the loads in the distribution transformers are at times quite close to the rated capacities of the transformers, leaving no capacity for power demand growth. Nonetheless, for now there seems to be no immediate need to increase the power distribution capacity of the low voltage network.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$I$	virta	[A]
$P$	pätöteho	[W]
$Q$	loisteho	[Var]
$R$	resistanssi	[ $\Omega$ ]
$S$	näennäisteho	[VA]
$U$	jännite	[V]
$X$	reaktanssi	[ $\Omega$ ]

## Alaindeksit

1	tarkasteltavan kohteen alku
2	tarkasteltavan kohteen loppu
d	muutos
h	häviö
hmax	suurin häviö
k	kuormitushäviö
kN	nimelliskuormitushäviö
n	nimellinen
p	pätökomponentti
q	loiskomponentti

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Lappeenrannan Energiaverkot Oy .....	8
3	Sähköajoneuvot ja sähkönjakeluverkko .....	10
3.1	Sähköajoneuvot ja lataustavat .....	10
3.1.1	Sähköautotyypit .....	10
3.1.2	Lataustavat .....	11
3.2	Sähkönjakelujärjestelmä .....	12
3.2.1	Keskijännitejakeluverkko .....	13
3.2.2	Pienjännitejakeluverkko.....	13
3.2.3	Energia- ja tehohäviöt sähkönjakeluverkossa.....	15
3.2.4	Jännitteenalenema .....	16
3.2.5	Kuormitusmallit .....	17
4	Analyysimenetelmät .....	18
4.1	Tarkasteltavat kohteet .....	18
4.2	Laskentamenetelmät.....	18
4.3	Laskentaparametrit ja oletukset.....	20
4.4	Muuntopiirien kuormitukset.....	23
5	Johtopäätökset ja yhteenveto .....	30
	Lähteet .....	32

# 1 Johdanto

Suomessa kotimaanliikenteen aiheuttamat kasvihuonepäästöt muodostivat noin 21 prosentin osuuden Suomen kokonaiskasvihuonepäästöistä vuonna 2019. Vaikka kotimaanliikenteen kasvihuonepäästöistä vähennetään raskas-, vesi-, rautatie- ja lentoliikenne, niin muodostavat ne silti yli 12 prosentin osuuden Suomen kokonaiskasvihuonepäästöistä. (Liikennefakta 2021a.) Tavoite henkilöliikenteen päästöjen vähentämisestä on saanut ajoneuvoteollisuuden suuret yritykset reagoimaan ja esimerkiksi Volkswagen on ilmoittanut lopettavansa polttomoottoriautojen myynnin Euroopassa vuoteen 2035 mennessä (Yle 2021). Myös kuluttajat ovat reagoineet, sillä elokuussa 2021 sähköisten ajoneuvojen myynti ylitti ensikertaa dieselkäyttöisten myynnin Euroopan tasolla (JATO 2021) ja Norjassa syyskuussa 2021 rekisteröidyistä autoista 95 prosenttia oli sähköä energialähteenään käyttäviä (OFV 2021). Ajoneuvokannan nopea sähköistyminen ja sähköajoneuvojen suuret lataustehot ovat herättäneet kysymyksiä sähkönsiirtokapasiteetin riittävydestä sähköisen liikenteen yleistyessä.

Liikenteen sähköistymisen vaikutuksista on erityisesti viime vuosina tehty tutkimusta sähköjakeluverkossa niin pienjännite, kuin keskijännitepuolellakin. Esimerkiksi Polatin et al. (2020) tutkimuksessa tarkastellaan tiettyä pilottialuetta. Tutkimuksessa on mallinnettu latauskäyttäytymistä alueen sähkön käyttäjien saapuessa töistä ja latauskäyttäytymisen vaikutuksia alueen pienjänniteverkossa. Tutkimuksessa on huomattu sähköisen ajoneuvokannan aiheuttavan ongelmia sekä liiallisena jännitteen alenemana että jakelumuuntajan ylikuormitumisena. Polatin et al. (2020) tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa on tärkeää huomioida, että heidän tutkimuksensa kohdistuu pilottiverkkoon, joka sijaitsee Hollannissa. Monessa maassa Suomen lisäksi ei ole ennestään ollut tarvetta varautua suuria tehonsiirtotarpeita aiheuttaviin tekijöihin kuten asuntojen sähkölämmitykseen kovalla pakkasella, sähköisiin saunan kiukaisiin tai autojen lämmitystolppiin.

Tämän työn tavoitteena on tehdä arvio liikenteen sähköistymisen aiheuttamasta huipputehonsiirron kasvusta ennalta määärityille muuntopiireille. Tavoite on määrittää suuntaa antavat arvot suurimmista kuormitusvirroista pienjännitejohtolähdöittäin sekä jakelumuuntajien kuormituksista.

Työssä keskitytään täysin ennalta määärityihin muuntopiireihin sekä pienjännitejakeluverkon puolella ilmeneviin kuormituksiin. Työssä ei oteta kantaa nykyisten liittymäkokojen riittävyteen ladattavien ajoneuvojen lisääntyessä. Työssä keskitytään vain kuormituksiin

muuntajilla sekä muuntamojen pienjännitejohtolähdöissä. Työssä ei myöskään huomioida jännitteenaleneman vaikutuksia tai häviötehon kasvua.

Pienjännitejakeluverkon tehonsiirtokapasiteetti on rajallinen matalan jännitetason vuoksi ja näin ollen kasvavien kuormien aiheuttamien ongelmien voidaan olettaa ilmenevän ensimmäisenä pienjännitejakeluverkon puolella. Tästä syytä tutkimuksessa on tavoitteena tarkastella jakelumuuntajien kuormituksia sekä niiden johtolähdöillä kulkevia kuormitusvirtoja kahden tyypillisen muuntopiirin alueella. Toinen tarkasteltavista muuntopiireistä sijaitsee omakotitaloalueella ja toinen kerrostaloalueella.

Työ alkaa lähtötietojen määrittelyllä. Lähtötiedoiksi tarvitaan liittymien käyttöpaikkojen lukumäärät, liittymäpaikkojen asuntotyypit sekä kuormitukset käyttöpaikoilla vuonna 2020. Vuoden 2020 tuntikohtaisen pohjakuorman päälle summataan tuntikohtainen latausteho. Tuntikohtaiset lataustehot määritetään ajoneuvojen energiankulutusten, vuoden ajoneuvo-kohtaisten ajosuoritteiden, käyttöpaikkakohtaisten ajoneuvojen lukumäärän sekä lataustehojakauman avulla.

Työn toisessa luvussa käsitellään Lappeenrannan Energiaverkkoja. Kolmannessa luvussa käsitellään sähköautoja sekä sähkönjakelujärjestelmää. Neljännessä luvussa käsitellään analyysimenetelmiä ja työn tuloksia. Viidennessä luvussa on työn johtopäätökset sekä yhteenveto.

Työn perusta pohjautuu seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Kestääkö tarkasteltavien sähkönjakeluverkon muuntopiirien jakelumuuntajat ja johtolähdöt sähköautokannan kasvusta aiheutuvan tehonsiirron tarpeen kasvun?
- Kuinka suuri muutos on havaittavissa tarkasteltavien sähkönjakeluverkon muuntopiirien jakelumuuntajien johtolähtöjen kuormitusvirroissa ja jakelumuuntajien kuormitustehoissa?
- Mitä vaikutuksia sähköautokannan kasvu aiheuttaa pienjännitejakeluvierossa?

## 2 Lappeenrannan Energiaverkot Oy

Lappeenrannan Energiaverkot Oy kuuluu Lappeenrannan kaupungin 100 % omistamaan energia- ja vesipalveluja tuottavaan Lappeenrannan Energia -konserniin. Konserni muodostuu emoyhtiöstä Lappeenrannan Energia Oy sekä tytäryhtiöistä Lappeenrannan Energiaverkot Oy ja Lappeenrannan Lämpövoima Oy. Emoyhtiö vastaa yhtiöiden yhteisistä palveluista sekä asiakaspalveluista. Energiaverkot vastaa verkko-omaisuuden hallinnasta, kehittämisestä sekä operoinnista, sähkönjakelusta Etelä-Karjalassa Lappeenrannan, Lemin, Taipalsaaren ja Savitaipaleen alueilla sekä kaukolämmön, maakaasun ja veden jakelusta sekä hankinnasta Lappeenrannan alueella. (Lappeenrannan Energia 2021.)



Kuva 2.1 Lappeenrannan Energiaverkkojen jakelualueet (Lappeenrannan Energia 2021)

Lämpövoima puolestaan vastaa toiminta-alueen lämpö- ja höyrylaitoksien, Mertaniemen voimalaitoksen, vedenottamoiden sekä jätevedenpuhdistamoiden käytöstä ja kunnossapidosta. Lämpövoima tuottaa sisäisille asiakkailleen kaukolämpöä sekä puhdasta vettä.



Ulkoisille asiakkaille Lämpövoima tuottaa höyryä ja Fingrid Oyj:lle häiriöreservisähköä. (Lappeenrannan Energia 2021.)

Jokapäiväisten omaisuuden hallinnan, käytön ja kunnossapidon sekä palvelujen tuotannon lisäksi Lappeenrannan Energia -konserni on osakkaana taulukon 2.1 mukaisissa yhtiöissä.

<b>KONSERNIN OSAKKUUSYHTIÖT:</b>	
Väre Energia Oy	16,5 %
Kaukaan Voima Oy	46 %
<u>Elyera</u> Oy	26,3 %
Suomen Hyötytuuli Oy	12,5 %
TuuliSaimaa Oy	9,7 %
<u>LähiTuuli</u> Oy	9,7 %
Vainikkalan Vesi Oy (Lappeenrannan Energiaverkot osakkaana)	100 %
<u>Enerva</u> Oy (Lappeenrannan Energiaverkot osakkaana)	20 %

Kuva 2.2 Lappeenrannan Energia -konsernin osakkuudet eri yhtiöissä (Lappeenrannan Energia 2021)

## 3 Sähköajoneuvot ja sähkönjakeluverkko

Sähköajoneuvolla voidaan yleisesti tarkoittaa mitä tahansa sähköä energialähteenään käyttävää kulkuvälinettä, mutta tässä työssä keskitytään vain rekisteröityihin henkilöliikennekäyttöisiin ajoneuvoihin. Tässä luvussa tarkastellaan sähköajoneuvotyyppejä, akkusähköajoneuvojen lataustapoja, sähkönjakeluverkkoja sekä akkusähköautojen latauksesta aiheutuvan energian- ja tehonsiirron kasvun aiheuttavia tekijöitä sekä niiden vaikutuksia jakeluverkossa.

### 3.1 Sähköajoneuvot ja lataustavat

Yleisesti henkilöliikennekäytössä olevat rekisteröidyt ajoneuvot voidaan jakaa autoihin ja moottoripyöriin. Tämän työn kannalta on oleellista tarkastella vain sähkökäyttöisiä autoja, sillä moottoripyörät eivät ole yleisesti jokapäiväisessä käytössä eikä niiden lukumäärä ole merkittävä verrattuna autojen lukumäärään (Liikenne fakta 2021b; Traficom 2021). Tässä luvussa tarkastellaan sähköautotyyppejä ja niiden toimintatapoja sekä akkusähköautojen latausmenetelmiä.

#### 3.1.1 Sähköautotyypit

Yleisimpiä sähköautoja ovat hybridautot ja täyssähköautot. Hybridautoista esiintyy kahdenlaista päätyyppiä; ei-ladattavia- ja ladattavia hybridejä.

Hybridautolla tarkoitetaan yleisesti autoa, jossa on kaksi voimanlähdettä – bensiini- tai dieselmoottorin lisäksi avustava sähkömoottori. Hybridautoissa on ajoakusto, jonka turvin voidaan mahdollisesti ajaa lyhyitä matkoja kokonaan sähköllä. Akusto latautuu ajon aikana moottorijarrutuksissa ja lisäksi polttomoottorin voimin kevyissä ajotilanteissa. (Motiva 2020a.)

Ladattava hybridi on muuten kuin tavallinen hybridi, mutta niissä on kasvatettu sähköistä toimintamatkaa merkittävästi isommalla akustolla sekä ajoneuvon ulkopuolisella latausmahdollisuudella. (Motiva 2020b.)

Täyssähköauton voimanlähteenä toimii sähkömoottori ja energiavarastona akusto, kuten ladattavassa hybridissäkin. Täyssähköautolla ei ole vaihtoehtoista voimanlähdettä. Täyssähköauton etuna muihin ajoneuvotyyppihin on hiljaisuus sekä paikallinen päästöttömyys.

Heikkouksina täyssähköautolle voidaan pitää lähtökohtaisesti kallista hankintahintaa, sekä rajallista toimintamatkaa, joka lyhenee talviolosuhteissa. (Motiva 2020c.)

### 3.1.2 Lataustavat

Sähköajoneuvojen lataukseen käytettävien sähköverkkojen suunnittelussa ja käytössä on noudatettava SFS 6000 standardisarjassa esitettyjä perusvaatimuksia. SFS 6000 standardisarjassa on määritetty sähköajoneuvoille tarkoitettut latausmenetelmät ja lataamiseen tarkoitettut asennukset. (Sesko 2021.)

Lataustavalla 1 tarkoitetaan hyväkuntoista tavallista vikavirtasuojalla suojattua kotitalouspistorasiaa lähteenään käyttävää latausta. Lataustapa 1 soveltuu vain kevyiden ja pienikokoisten sähköajoneuvojen lataustavaksi, esimerkiksi sähköpolkupyörille, skoottereille ja ruohonleikkureille. (Sesko 2021.)

Lataustapa 2 tarkoittaa tilapäistä kotitalouspistorasiasta tapahtuvaa latausta. Lataustavan 2 latauskaapelissa on rajoitin, joka rajoittaa latausvirran 6–10 ampeeriin. Standardisarjassa SFS 6000 on määritetty, että pitkäaikainen latausvirta lataustavalla 2 on saa olla enintään 8 ampeeria. Lataustavan 2 latauskaapeli tulee tyypillisesti ladattavan auton mukana ja sen käyttöön soveltuvat normaalit kotitalouspistorasiat ja autonlämmitystolppien pistorasiat. Lataustapa 2 ei kuitenkaan sovellu jatkuvaan lataukseen ja onkin suositeltu käytettäväksi vain tilapäisesti. (Sesko 2021; Motiva 2021.)

Lataustavan 3 lataus tapahtuu kiinteällä sähköautolle tarkoitettulla latauslaitteella. Tämä lataustapa on tarkoitettu sähköautojen vakituiseen lataamiseen kotona ja työpaikoilla. Lataustavan 3 mukainen kiinteälatauspiste voi syöttää autoa 22 kW:n teholla. Lataustavan 3 latausjärjestelmään kuuluu tiedonsiirtoväylä, joka varmistaa onko ajoneuvo kytketty asianmukaisella tavalla. Tiedonsiirtoväylä mahdollistaa myös kuorman ohjaamisen sekä virran syötön molempiin suuntiin. (Sesko 2021; Motiva 2021.)

Lataustapa 4 tarkoittaa pika- / teholatausta. Tässä lataustavassa käytetään auton ulkopuolista tasavirtalaturia, jossa latausjohto on kiinteästi liitetty latauspisteeseen. Pikalataustekniikka mahdollistaa sähköauton akuston lataamiseen 80 % varausasteeseen jopa 15–30 minuutin latauksella. Kaikki sähköautot eivät kuitenkaan sovellu pikaladattaviksi. Pikalataukseen soveltuvassa autossa on erillinen tarkoitukseen soveltuva liitin. Pikalatauspisteiden latausvirrat ovat nykyisin satoja ampeereita ja lataustehot yltyvät tietyillä latureilla jopa 350 kW

tehoihin. Pikalatauspisteet soveltuvat parhaiten palveluasemille sekä muihin paikkoihin, joissa tarvitaan nopeaa lataamista. Pikalatauspisteiden latauspistokkeissa on myös lataustavan 3 kanssa samanlainen tiedonsiirtoväylä. (Sesko 2021; Motiva 2021.)

Lataustapojen 1–4 lisäksi on olemassa myös täysin johdoton sähköajoneuvojen latausmenetelmä. Johdottomalla latausmenetelmällä sähköajoneuvoa voidaan ladata siirtämällä latausenergia induktiivisesti esimerkiksi tienpintaan upotettujen ja ajoneuvojen alle asennettujen käämien välillä. (Sesko 2021.)

### 3.2 Sähkönjakelujärjestelmä

Sähkönjakeluverkkoliiketoiminta on säädeltyä alueellista monopolitoimintaa. Suomessa toimii vajaat sata sähkönjakeluverkkoyhtiötä, joilla kaikilla on Energiamarkkinaviraston vahvistama jakelualue. Tämän alueen rajojen sisäpuolella verkkoyhtiöllä on yksinoikeus rakentaa sähkönjakeluverkkoja, lukuun ottamatta yksittäisten käyttäjien liittymisjohtoja, joiden rakennuttamisen kilpailutukseen sähkönkäyttäjällä on oikeus. (Lakervi & Partanen 2008, 19.)

Sähkönjakeluverkon tekninen tehtävä on siirtää sähkönsiirtoverkon ja/tai suoraan jakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähköenergia sähkön loppukäyttäjille. Sähkönjakelujärjestelmä koostuu alueverkosta (110 kV, 45 kV), sähköasemista (110/20 kV, 45/20 kV), keskijänniteverkosta (20 kV), jakelumuuntamoista (20/0,4 kV) sekä pienjänniteverkosta (0,4 kV). Tässä luetellut jännitetasot ovat tavanomaisia Suomessa esiintyviä jännitetasoja, ja niiden lisäksi esiintyy myös muita jännitetasoja. Esimerkiksi pienjännitejakeluverkossa esiintyy 1 kV:n verkkoa ja keskijänniteverkossa voi esiintyä joillakin alueilla esimerkiksi 10 kV:n verkkoa. (Lakervi & Partanen 2008, 11.)

Sähkönjakeluverkossa eri jännitetasoja vertailtaessa on monesti havaittavissa melko paljon yhtäläisyyksiä. Esimerkiksi sekä keskijännite- että pienjänniteverkkoja käytetään normaalisti säteittäisinä. Säteittäisyydellä tarkoitetaan tavallisesti sitä, että verkossa on yksi yhteinen syöttöpiste. Syöttöpisteenä keskijänniteverkossa yleensä toimii 110/20 kV sähköasema ja pienjänniteverkossa 20/0,4 kV jakelumuuntamo. Verkkojen yhtäläisyyksien ansiosta samankaltaisuuksia esiintyy esimerkiksi sekä keskijännite- että pienjänniteverkkojen mitoitus- ja suojausperiaatteissa. (Lakervi & Partanen 2008, 158.)

Tässä luvussa tarkastellaan keskijännite- ja pienjännitejakeluverkkoja erikseen, sekä sähköjakeluverkossa tapahtuvia energia- ja tehohäviöitä, että sähköjakeluverkossa ilmenevää jännitteenalenemaa ja kuormitusmalleja.

### 3.2.1 Keskijännitejakeluverkko

Suomessa keskijännitejakeluverkon jännitetaso on tavanomaisesti 20 kV, mutta joissakin kaupungeissa on käytössä myös muun muassa 10 kV:n jännitetasoa. Suomessa keskijänniteverkko on joko maasta erotettu tai ”sammutettu” sammutuskuristimen avulla. Keskijänniteverkko alkaa sähköasemalta lähtevistä keskijännitelähdöistä. Keskijännitelähdöissä johdon suojana käytetään katkaisijaa, johon on kytketty ylivirtarele, maasulkurele sekä jälleenykyntärele. Keskijänniteverkkoa käytetään säteittäisenä, vaikka verkko onkin monesti rakennettu silmukoiduksi. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

Keskijänniteverkolla on merkittävä vaikutus verkon käyttövarmuudessa. Sähkökäyttäjien kokemista keskeytyksistä yli 90 % aiheutuu keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista. Normaalien sähköjakelutoiminnan lisäksi keskijänniteverkolla on merkittävä rooli pahoissa 110 kV johtojen ja sähköasemien vikatilanteissa, sillä niissä tapauksissa keskijänniteverkkoa voidaan käyttää varayhteysvaihtoehtona. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

Maaseudun keskijänniteverkosto on perinteisesti rakennettu avojohtoverkkona eikä kaapeloituna. Haja-asutusalueilla ei ole tarvetta eikä oikein mahdollisuuksiakaan varayhteystarkasteluja laajemmille verkkotopologiatarkasteluille tai yksinkertaistetuille suunnitteluohjeistoille. Taajamien maakaapeliverkoissa sen sijaan on olennaista pohtia muun muassa kaapeliverkon muotoa, maksimikuormitusasteita ja sähköasemien sekä lähtöjen korvattavuuskysymyksiä. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

### 3.2.2 Pienjännitejakeluverkko

Tavanomaisesti Suomessa pienjännitejakeluverkossa esiintyy 20/0,4 kV:n jakelumuuntamoja ja näin ollen yleisin pienjännitejakeluverkossa esiintyvä pääjännite on 400 V (Lakervi & Partanen 2008, 157). 400 V:n pienjännitejakelujärjestelmän lisäksi Suomessa on kehitetty 1000 V:n pienjännitettä hyväksikäyttävä sähköjakelujärjestelmä. 1000 V:n jännitetasoa hyödyntämällä pystytään pienitehoiset ja vika-alttiit keskijännitejohtohaarat muuttamaan kustannustehokkaasti pienjännitteellä toimiviksi. Tällä tavoin saadaan vikojen määrää sekä

vaikutusaluetta pienennettyä, sillä 1000 V:n jännitetasolla rakennettu johtohaara muodostaa oman suojausalueensa, eikä vaikuta vaurioituessaan muihin saman keskijännitesyöttöalueen asiakkaisiin. Lisäksi etuna 1000 V:n järjestelmällä verrattaessa keskijänniteavojohtorakenteeseen on AMKA-riippukierrekaapelien käyttömahdollisuus. AMKA-riippukierrekaapelit ovat käyttövarmuudeltaan huomattavasti keskijänniteavojohtoja parempia. (Lakervi & Partanen 2008, 168.)

Pienjännitejakeluverkon vikavirta- ja ylikuormitussuojaus hoidetaan jakelumuuntamalla. Suomessa jokainen jakelumuuntamon johtolähtö on varustettu sulakkeilla. Saneeraus uuden jakelumuuntajan avulla aiheutuu tavanomaisesti liian suuresta jännitteenalenemasta pienjänniteverkossa tai vaihtoehtoisesti liian pienestä vikavirrasta verrattaessa lähdön sulakekoon, jolloin automaattinen poiskytkentä ei toimi säädösten mukaisesti. Vaihtoehtoinen tapa jakelumuuntamoiden saneeraamiselle on pienjännitejohtojen vaihtaminen poikkipinnaltaan isompiin. (Lakervi & Partanen 2008, 157.)

Jakelumuuntamot muodostuvat keskijännitekiskostosta, vähintään yhdestä jakelumuuntajasta, pienjännitelähdöistä sekä mahdollisesti apujännitejärjestelmästä. Käytettävän muuntamon tyyppiin vaikuttavia asioita ovat muun muassa verkostorakenne ja seutu. Verkostorakenteella tässä tapauksessa tarkoitetaan sitä, onko kyseessä ilmajohto vai kaapeloitu alue ja seudulla sitä, onko kyseessä taajama- vai haja-asutusalue. Maaseudulla ilmajohtoverkossa käytetään yleensä pylväsmuuntamoita. Pylväsmuuntamoissa keskijännitejohto kytkeytyy normaalisti muuntajan ensiöliittimiin erottimen välityksellä. Pylväsmuuntamon tapauksessa ei siis varsinaisesti voida puhua keskijännitekiskostosta. Pylväsmuuntamot soveltuvat pienille tehoille, enintään 315 kVA:n muuntajille. Pylväsmuuntamoille tavallisia nimellistehoja ovat 50 ja 100 kVA. Taajamaverkoissa puisto- ja kiinteistömuuntamot ovat varsin yleisiä. Jakelumuuntamo toimii taajamaverkoissa osana keskijännitekaapeliengasta. Lähdöissä on katkaisija tai tehoerotin. Tällaisten muuntajien nimellistehot ovat usein 1000 kVA:n luokkaa. Maakaapeliverkossa myös käytetään säteittäin syötettäessä ”satelliittimuuntamoja”, jotka ovat rakenteeltaan yksinkertaisia. Niiden keskijänniteliitos toteutetaan helppokäyttöisillä *elbow*-liittimillä. Satelliittimuuntamon kytkinlaitteet ovat haaraa syöttävällä suuremmalla muuntamalla. Tällaiset muuntamot sopivat erinomaisesti esimerkiksi tilanteisiin, joissa taajama-alueen tehonsyöttötarve kasvaa. Lisäksi niiden käyttö on koko ajan yleistyvässä maaseudun maakaapelialueilla. Satelliittimuuntamoiden muuntajat ovat usein nimellisteholtaan 300 kVA:n luokkaa. (Lakervi & Partanen 2008, 157–158.)

### 3.2.3 Energia- ja tehohäviöt sähköjako- verkossa

Energian siirto sekä energian muuntaminen muodosta toiseen aiheuttaa energiahäviötä lähes poikkeuksetta. Sähköjako- verkossa sähköjako- johdot ja -muuntajat aiheuttavat energiahäviötä, joka ilmenee lähes täysin sähköenergian muuntumisena lämmöksi. (Lakervi & Partanen 2008, 35.)

Sähköjako- lun taloudellisuutta tarkasteltaessa sähköjako- johdoissa ja -muuntajissa tapahtuvilla tehohäviöillä on merkittävä rooli. Hukkaan menevän tehon lisäksi tehohäviöt voivat aiheuttaa eristysten kannalta vahingollisen korkeita lämpötiloja. Tehohäviöiden laskennallista määrittämistä varten tarvitaan lähtötietoina jännitteen ja impedanssien lisäksi kuormitusvirta. (Lakervi & Partanen 2008, 34–35.)

$$P_h = 3 \cdot I^2 R \quad (3.1)$$

$$Q_h = 3 \cdot I^2 X \quad (3.2)$$

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot P_{kN} \quad (3.3)$$

Yhtälöt 3.1 ja 3.2 kuvaavat sähköjako- verkon johtimissa tapahtuvia tehohäviöitä. Yhtälöissä alaindeksillä  $h$  kuvataan häviötä,  $P$  kuvaa pätötehoa,  $Q$  loistehoa,  $I$  vaihevirtaa,  $R$  johtimen resistanssia ja  $X$  johtimen reaktanssia. Yhtälöitä tarvitaan kaksi, sillä kokonaisvirta saa aikaan resistanssissa pätöteho- häviöitä ja reaktanssissa loistehohäviöitä. Yhtälö 3.3 kuvaa muuntajassa aiheutuvia kuormitushäviöitä.  $P_k$  tarkoittaa kuormitushäviötä,  $S$  hetkellistä kuormitusta,  $S_n$  muuntajan nimellistehoa ja  $P_{kN}$  nimelliskuormitushäviötä. Muuntajan kuormitushäviöiden määrittämisessä tarvitaan lähtötietoina muuntajan kuorma sekä muuntajan arvokilvestä löytyvät nimellistehon ja nimelliskuormitushäviön. Muuntajassa tapahtuvan kuormituksesta riippuvaisen kuormitushäviön lisäksi muuntaja aiheuttaa tyhjäkäyntihäviötä, joka on muuntajan kuormituksesta riippumaton. Tyhjäkäyntihäviö aiheutuu muuntajan rautasydämessä tapahtuvasta magneettivuon vaihtelusta. (Lakervi & Partanen 2008, 34.)

Häviöistä aiheutuvien kustannusten määrittämiseksi on olennaista laskea johdossa ja muuntajassa syntyvät energiahäviöt. Energiahäviöiden laskentaa varten on selvitettävä häviötehot tiettyinä ajanhetkinä. Jotta vuotuinen energiahäviö voitaisiin määrittää tarkasti, on oltava tiedossa häviöteho vuoden jokaiselle ajankohdalle. Tarkan häviöenergian määrittäminen on varsin työläs prosessi, eikä se käsin ole toteutettavissa. Käsinlaskennassa voidaan hyödyntää yhtälöä 3.4. Käsinlaskentaa varten tarvitsee olla tiedossa vuoden suurin häviöteho sekä häviöiden

huipunkäyttöaika. Mikäli huipunkäyttöajasta ei ole tietoa, on mahdollista hyödyntää taulukon 3.1 arvoja. (Lakervi & Partanen 2008, 35.)

$$\int_0^T P_h(t) dt \approx P_{h\max} t_h \quad (3.4)$$

Yhtälössä 3.4 muuttuja  $t$  kuvaa aikaa,  $P_h$  häviötehoa,  $P_{h\max}$  suurinta vuodenaikana ilmenevää häviötehoa ja  $t_h$  kuvaa vuosikohtaista häviöiden huipunkäyttöaika.

Taulukko 3.1 Häviöiden huipunkäyttöaikoja (Lakervi & Partanen 2008, 35.)

Verkon osa	Häviöiden huipunkäyttöaika $t_h$ , [h/a]
Pienjänniteverkko	700–1000
Keskijänniteverkko	2000–2500
Sähköasema	3000–3500
Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt	8760

#### 3.2.4 Jännitteenalenema

Jännitteen suuruus on merkittävä sähkön ja sähkönjakelun laatutekijä, sillä sähkölaitteiden toiminnan kannalta on oleellista, että jännitetaso sähkön käyttöpaikalla pysyy tiettyjen raja-arvojen sisäpuolella. Koko jakelujärjestelmän komponenttien, eli keskijännitejakeluverkon, jakelumuuntajien ja pienjännitejakeluverkon jännitteenalenemien summa on sähkönjakelujärjestelmän jännitteen alenema. Suurjännitevoimasiirtoverkon puolella muuntajilla olevat automaattiset käämikytkimet mahdollistavat sen, että sähkönloppukäyttäjillä ei siirtoverkon jännitteen alenema näy. Näin ollen suurjännitesiirtoverkossa käyttölaitteiden valintaan vaikuttavat vain käyttövarmuus ja taloudellisuus. (Lakervi & Partanen 2008, 38.)

Jakeluverkkolaskuissa eniten yleensä kiinnostaa jakelujohdon alku- ja loppupäiden itseisarvoisten jännitteiden erotus maksimikuormituksella. Jännitteenalenema voidaan laskea yhtälön 3.5 avulla. Yhtälöllä 3.6 voidaan määrittää jännitteenalenema prosentuaalisesti. Yhtälöt 3.5 ja 3.6 soveltuvat tavanomaisien tilanteiden laskennassa. Vikatilanteissa niitä ei voi hyödyntää. (Lakervi & Partanen 2008, 38–39.)

$$U_d = |U_1| - |U_2| \approx IR\cos\phi + IX\sin\phi = I_p R + I_q X \quad (3.5)$$

$$U'_h = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot (I_p R + I_q X)}{U} = 100 \cdot \frac{P}{U^2} (R + X \tan\phi) \quad (3.6)$$



Yhtälöissä 3.5 ja 3.6  $I$  tarkoittaa vaihevirtaa,  $R$  resistanssia,  $X$  reaktanssia,  $I_p$  resistiivista virtaa,  $I_q$  reaktiivista virtaa,  $U_d$  jännitehäviötä,  $U_h$  prosentuaalista jännitehäviötä,  $U$  pääjännitettä,  $U_1$  tarkasteltavan kohteen alkupään pääjännitettä,  $U_2$  tarkasteltavan kohteen loppupään pääjännitettä ja  $\emptyset$  kulmaa pätötehon ja loistehon välillä.

### 3.2.5 Kuormitusmallit

Kuormitusten ajallisen vaihtelun tunteminen on tärkeää sähköverkkoyhtiöille jakeluverkon teknisen mitoituksen kannalta, sekä energiayhtiöille tariffisuunnitteluun ja sähkön hankinnan riittävyuden arvioimiseen. Sähköverkkoja suunniteltaessa on ensin arvioitava uuden verkon kuormien suuruus ja niiden mahdolliset kasvuprosentit alueellisesti. Näiden kuormien pohjalta pystytään tarkastelemaan maksimikuormia sekä verkon riittävyttä kuorman siirtämiseen. (Elovaara & Haarla 2011, 78–79.)

Sähkönjakeluverkossa kuormitusten ennustamiseen käytetään nykyisin tavallisesti vuonna 1983 käynnistetyn kuormitustutkimuksen avulla hankittujen tietojen pohjalta määritettyjä kuormituskäyriä. Tutkimus käynnistettiin 40 sähköyhtiön toimesta, ja sen avulla määritettiin tuhannen erilaisen kuluttajan kuormitustiedot vuoteen 1996 mennessä. Kuormitustietoja ylläpitää VTT Energia. Kuormituksen ennustamiseksi lähtökohdaksi valitaan vuosienenergiankulutus, jonka avulla määritetään arviot keskimääräiselle tuntiteholle ja sen hajonnalle. Keskimääräiselle tuntiteholle ja sen hajonnalle saadaan kertoimet määritettyä kuormitustutkimuksen datasta, kun tiedetään vuosienenergiankulutuksen lisäksi kuluttajaluokka, vuoden ajankohta, viikonpäivä sekä vuorokauden tunti. (Elovaara & Haarla 2011, 82–84.)

Kuormituskäyrän pohjalta voidaan muodostaa pysyvyyskäyrä laittamalla kuormituskäyrän tehot suuruusjärjestykseen. Sähkötalon pysyvyyskäyrältä pystytään lukemaan esimerkiksi kuinka kauan tietty teho on ollut saavutettuna tai ylitettynä. (Elovaara & Haarla 2011, 85.)

## 4 Analyysimenetelmät

Työssä tarkastellaan kahta toisistaan erillistä muuntopiiriä. Tarkoituksena on tuottaa suuntaa antava arvio vuoden huipputehonsiirtotarpeesta sekä korkeimmista ilmenevistä kuormitusvirroista muuntamoiden pienjännitelähdöittäin. Arvion muodostamista varten selvitetään vuoden 2020 kuormitukset, joiden päälle summataan arvio sähköautojen latauksen aiheuttamasta tehonsiirron kasvusta.

Tässä luvussa käydään läpi työssä tarkasteltavat kohteet, analyysi työn tuloksista, analyysin tueksi tehdyt laskut, laskentamenetelmät, laskennassa käytetyt parametrit sekä laskennan yksinkertaistamiseksi tehdyt oletukset.

### 4.1 Tarkasteltavat kohteet

Tarkasteltavina kohteina on kaksi erillistä muuntopiiriä. Muuntopiirin 1 alueella sijaitsee pääasiassa omakoti- ja rivitaloasuntoja, kun taas muuntopiirin 2 alueella on pääasiassa kerros- ja rivitaloasuntoja. Taulukosta 4.1 voidaan huomata asuintalotyyppien heijastuvan voimakkaasti liittymien ja käyttöpaikkojen suhteeseen.

Taulukko 4.1 Kohteiden liittymien ja käyttöpaikkojen lukumäärä johtolähdöittäin

Muuntamo 1			Muuntamo 2		
Lähtö	Liittymät	Käyttöpaikat	Lähtö	Liittymät	Käyttöpaikat
1	6	6	1	1	38
2	14	27	2	1	13
3	16	19	3	1	46
4	16	19	4	4	20
5	20	22	5	1	26
6A	1	1	6	7	46
6B	1	1	7	1	49

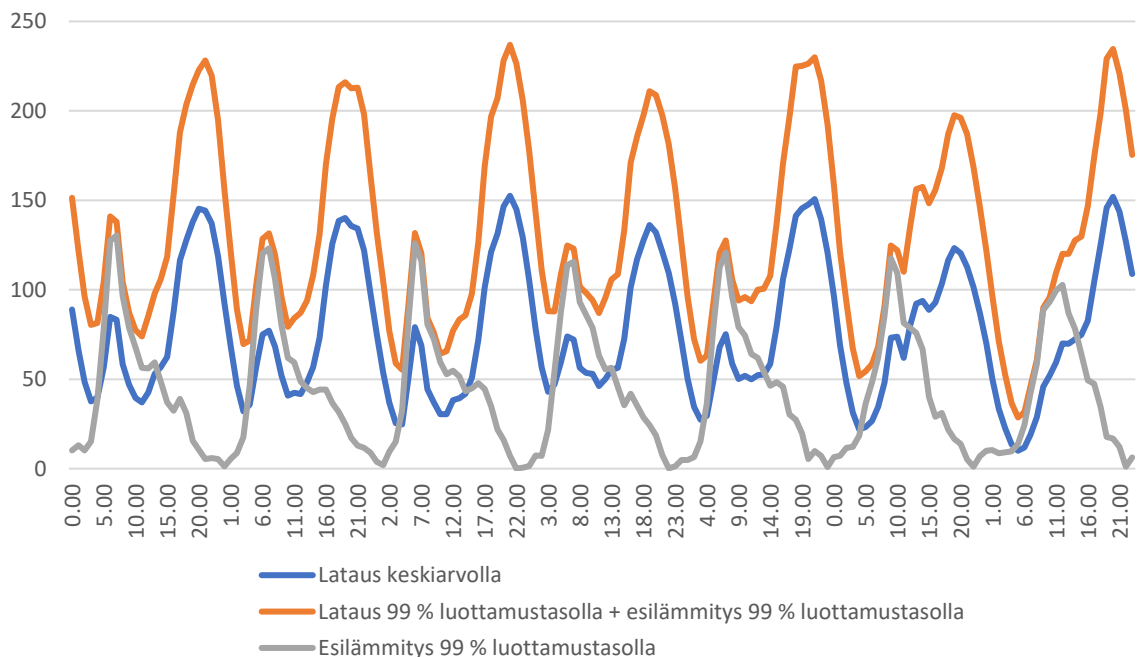
### 4.2 Laskentamenetelmät

Analyysin tueksi tehtävä arvio huippukuormista tarkasteltavien kohteiden pienjännitelähdöissä perustuu todellisen vuoden 2020 pohjakuorman päälle laskettavaan hetkellisten lataustehojen jakautumiseen.

Vuosilatausenergia on määritetty Tilastokeskuksen tietojen pohjalta saaduista Manner-Suomen liikennesuoritteista ja rekisteröityjen autojen lukumäärästä, sähköajoneuvojen

keskimääräisen energiankulutuksen arviosta sekä käyttöpaikkakohtaisten sähköajoneuvojen lukumäärän arviosta. Tilastokeskukselta saatujen tietojen pohjalta määritetään keskimääräinen yhden auton vuosittainen kilometrikertymä. Vuosilatausenergia saadaan kertomalla ajoneuvokohtainen vuosittainen kilometrikertymä auton kilometrikohtaisella energiankulutuksella.

Vuosilatausenergia ei sellaisenaan kerro liikenteen aiheuttamasta hetkellisestä tehonsiirron tarpeesta mitään merkittävää. Jotta voitaisiin tarkastella tehonsiirron tarpeen kasvua, on vuosilatausenergia sovitettava tarkoitukseen sopivalla lataustehojakaumalla aikariippuvaiseksi lataustehoksi. Työssä käytettävä lataustehojakauma on saatu käyttöön Tikka et al. tutkimusraportin pohjalta. Työssä käytetään valmista lataustehojakaumaa, sillä lataustehojakauman muodostaminen on varsin työläs prosessi, eikä kandidaatintyöhön mitoitettu aika tai resurssit riitä sellaisen muodostamiseksi.



Kuva 4.1 Työssä käytettävä ohjaamattoman latauksen lataustehojakauma -20 °C ulkolämpötilassa

Kuvan 4.1 lataustehojakauma sopii huipputehonkulutusten tarkasteluun, sillä se on määritetty -20 °C ulkolämpötilassa tapahtuvan latauksen tarkasteluihin. Lisäksi lataustehojakauma kuvaa ohjaamatonta latausta ja on tarkoitettu useiden käyttöpaikkojen tarkasteluun. Käytössä oleva lataustehojakauma ei päde yksittäisten käyttöpaikkojen tarkastelussa, sillä yksittäisen sähkökäyttäjän kulutustavat ja tässä tapauksessa latausajankohdat voivat vaihdella voimakkaasti päivittäin.

Todellinen arvio kuormista pienjännitelähdöittäin saadaan summaamalla jokaisen johtolähdön takana olevien käyttöpaikkojen olemassa olevat tuntikohtaiset kuormat sekä lataustehojakaumalla, vuosienergiankulutuksella ja johtolähdön takana olevien ladattavien autojen lukumäärällä määritetyt tuntikohtaiset lataustehot keskenään. Arvio suurimmasta ilmenevästä tuntikohtaisesta lataustehosta saadaan lajittelemalla arvot suuruusjärjestykseen. Samalla muodostetusta arvojoukosta saadaan muodostettua pysyvyyskäyrät.

Johtolajin riittävyden arvioimiseksi suurimmista johtolähtökohtaisista tehoista saadaan määritettyä suurimmat tuntikohtaiset kuormitusvirrat ratkaisemalla virta yhtälöstä 4.1, kun muuntajan toisipuolen pääjännite sekä johtolähdön suurin ilmenevä teho on tiedossa (Lakervi & Partanen 2008, 28). Kuormitusvirtaa verrataan Energiaverkkojen verkkotietojärjestelmässä oleviin johtolajien kuormitusvirran kestävyysiin.

$$P = \sqrt{3}UI\cos\phi \quad (4.1)$$

Yhtälössä 4.1  $P$  kuvaa tehoa,  $U$  pääjännitettä,  $I$  vaihevirtaa ja  $\phi$  kulmaa pätö- ja loistehon välillä.

Jakelumuuntajaan kohdistuvat kuormitukset määritetään summaamalla muuntajan pienjännitelähtöjen kuormitukset keskenään. Kuormitusten tuntikohtaiset summat kertovat jakelumuuntajan tuntikohtaiset kuormitukset. Suurin tuntikohtainen kuormitus muuntajalta saadaan samalla tavalla lajittelemalla kuormitusten arvot suuruusjärjestykseen kuten johtolähtöjen kuormituksetkin. Jakelumuuntajan kuormitusten järjestetystä arvojoukosta saadaan myös muodostettua pysyvyyskäyrät. Muuntajien pysyvyyskäyrät ja huipputehoarviot ovat luotettavampia kuin yksittäisten johtolähtöjen, sillä muuntajan kuormitukseen vaikuttavat kaikki muuntopiirin sähkönkäyttöpaikat ja osalla johtolähdöistä on hyvin vähän käyttöpaikkoja.

#### 4.3 Laskentaparametrit ja oletukset

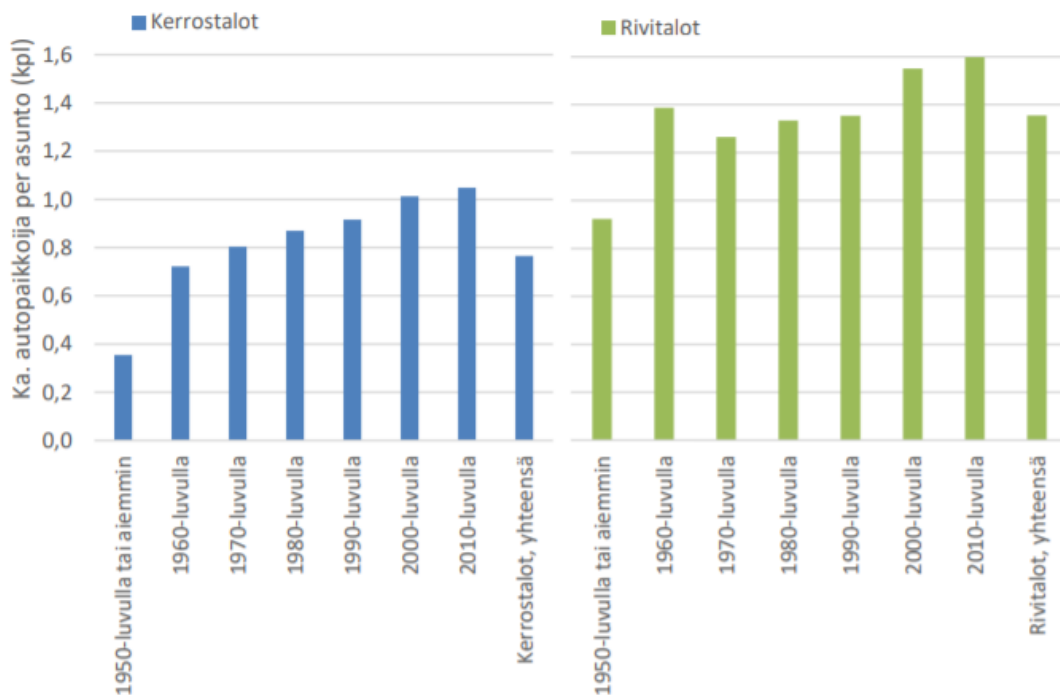
Laskentaparametrien määrittäminen on merkittävässä roolissa, kun arvioidaan huipputehonsiirron tarvetta ja kasvua. Jo pieni muutos esimerkiksi ajoneuvon energiankulutuksessa voi vaikuttaa laskennan tuloksiin hyvin merkittävästi. Tämän vuoksi on tärkeää määrittää parametrit luotettavalla tavalla ja mahdollisimman lähelle todellisia arvoja.

Jo työn rajauksessa on tullut selväksi, että työssä tarkastellaan vain pienjänniteverkon ja jakelumuuntajien kuormituksia, koska pienjänniteverkon tehonsiirtokapasiteetin tiedetään olevan merkittävästi keskijänniteverkkoa ja suurjänniteverkkoa pienempi matalan jännitetason vuoksi. Tämän vuoksi on mahdollista tehdä oletus, että sähköisten ajoneuvojen aiheuttaman energiansiirtotarpeen aiheuttamat ongelmat esiintyvät ensimmäisenä pienjännitejake-luverkon puolella.

Tavoitteena on selvittää, riittääkö pienjänniteverkon kuormituksen kantokyky siirtämään sähköautojen aiheuttaman kuormituksen kasvun, joten oletetaan koko muuntopiirien alueiden autokantojen muuttuvan täysin ladattaviksi sähköautoiksi. Lisäksi, koska työssä arvioidaan suurinta esiintyvää kuormitusta, voidaan olettaa suurimman kuormituksen esiintyvän talvikuukausien aikana, sillä jo ennestään kuormitusten tiedetään olevan talvisin suurempia muun muassa asuntojen lämmitystarpeen, autojen sisätilojen ja moottorien lämmityksen sekä vuodenajasta johtuvan pimeyden vuoksi, mutta myös koska sähköautojen energiankulutusten tiedetään kasvavan normaaliolosuhteisiin nähden kovalla pakkasella merkittävästi.

Sähköautojen kulutukseksi normaaliolosuhteissa oletetaan 20 kWh/100 km yleisien sähköautojen WLTP-mittauksien, ajokokeiden ja aiempien tutkimuksien käyttämien arvojen pohjalta. Haon et al. (2019) tutkimuksessa on huomattu sähköautojen energiankulutuksen kasvavan normaaliolosuhteiden energiankulutuksen tasosta 2,4 kWh/100 km joka viiden celsius-asteen laskun välein, kun 10 celsius-astetta on alitettu. Näin ollen huipputehonsiirtotarpeen määrittämisessä käytetään sähköautoilla energiankulutuksena 34 kWh/100 km.

Autokannan määrittämisessä ei ole tiedossa autojen osoite- tai sähkökäyttöpaikkakohtaisia lukumääriä, joten tämän suhteen joudutaan tekemään oletuksia. Paakkisen et al. (2018) tutkimuksen mukaan kerrostaloissa on keskimäärin 0,75 autopaikkaa asuntoa kohden ja rivitaloissa on keskimäärin 1,35 autopaikkaa asuntoa kohden. Tutkimuksessa ei kuitenkaan ole otettu kantaa omakotitalojen autopaikkojen lukumäärään, joten omakotitaloissa oletetaan olevan kaksi autoa asuntoa kohden.



Kuva 4.2 Autopaikkojen asuntokohtainen lukumäärä (Paakkinen et al. 2018)

Vuoden 2020 kuormitusten määrittämisessä ilmeni, että pienjänniteverkossa olevien käyttöpaikkojen loistehon mittaustuloksia ei säilytetä, koska niillä ei ole vaikutusta laskutukseen. Näin ollen loistehoa ei voida huomioida ja loisteho oletetaan mitättömän pieneksi tarkasteltavilla kohteilla. Tästä syystä yhtälöä 4.1 käytettäessä  $\cos\phi$  saa arvon yksi, eikä näin ollen vaikuta laskentaan.

Huipputehonkulutuksen arviota tehdessä ei oteta huomioon sähkökäyttöpaikoilla mahdollisesti vierailuvia henkilöitä, joiden mahdollista sähköajoneuvoa saatetaan ladata käyttöpaikoilla, lomaliikenteen vaikutusta lataukseen kotitalouksissa, autojen mahdollista latausta kotitalouksien ulkopuolisilla latauspisteillä, mahdollisesti yleistä älykkäitä sähköauton latausjärjestelmiä tai muita luvun neljä aikana mainitsematta jätettyjä tekijöitä.

Taulukko 4.2 Työssä käytettävät parametrit

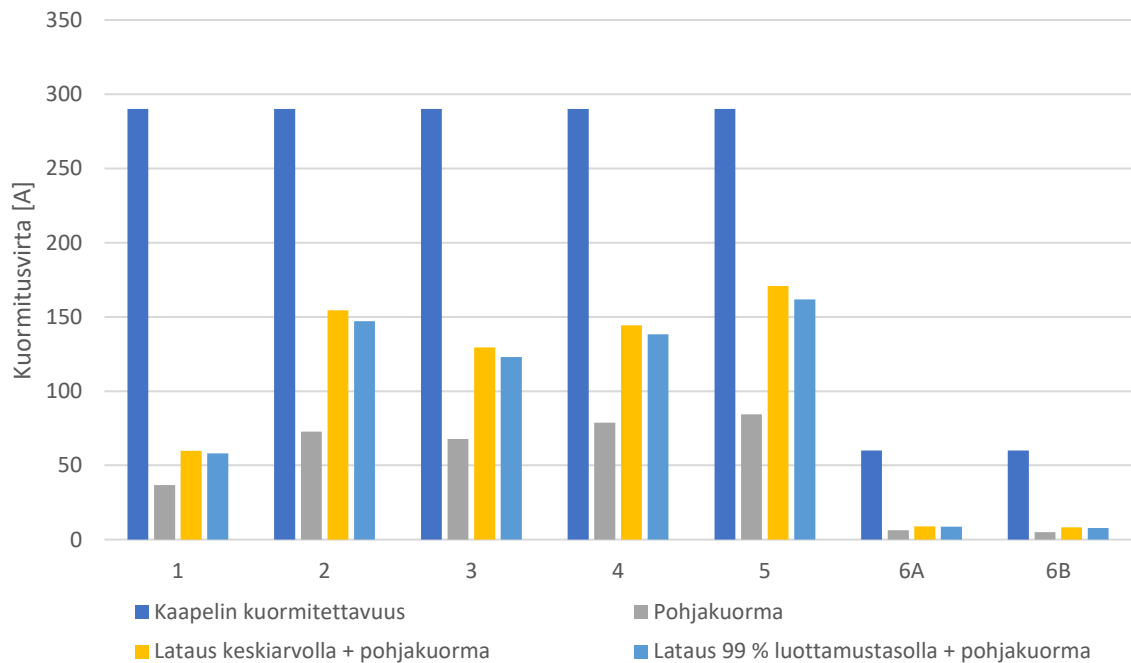
Ajoneuvot		Autopaikat			Jakelumuuntajat	
Liikennesuoritteet [km/vrk]	Kulutus [kWh/km]	Omakotitalo	Rivitalo	Kerrostalo	Nimellisteho [kVA]	Toisiopuolen pääjännite [V]
50,0	0,34	2	1,35	0,75	500	400

Tilastokeskuksen arvoilla määrittämällä vuorokausikohtaisiksi liikennesuoritteiksi tulee 38,6 km. Tilastokeskuksen arvoilla määritetty arvo on koko vuoden liikennesuoritteiden auto

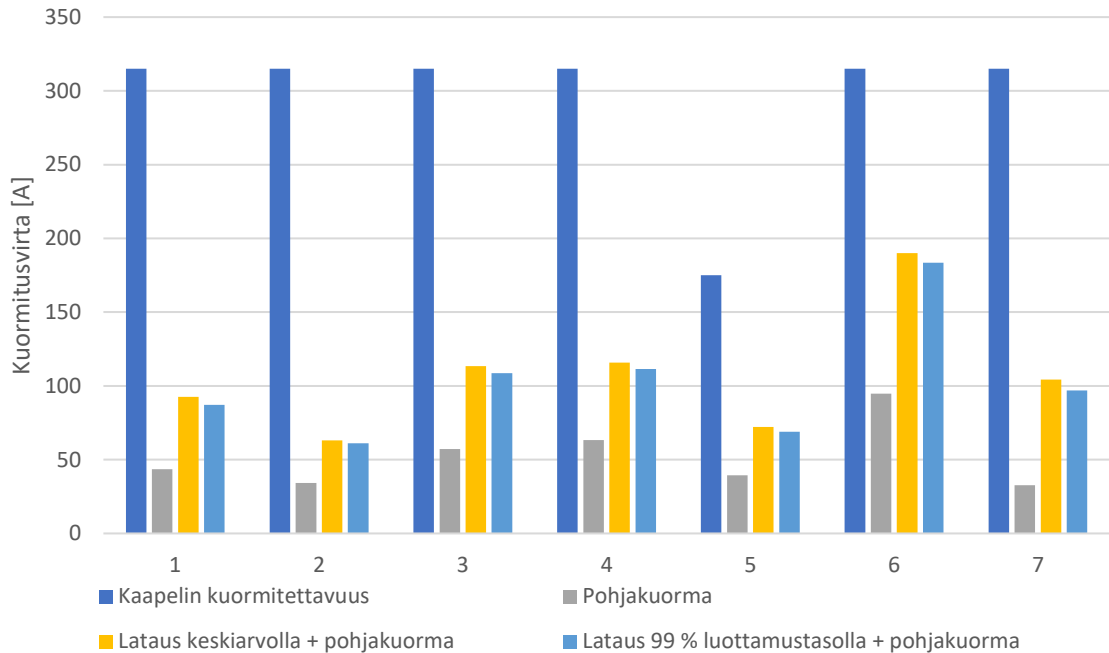
kohtainen keskiarvo, joten tulosta on skaalattava ylöspäin, sillä vuorokausikohtaiset liikennesuoritteet vaihtelevat vuorokausikohtaisesti sekä alueellisesti.

#### 4.4 Muuntopiirien kuormitukset

Laskentatuloksien johtolähtöjen tuntikohtaisista kuormitusvirroista suodatettiin suurimmat johtolähtökohtaiset arvot ja niiden avulla muodostettiin kuvat 4.3 ja 4.4. Kuvien perusteella voidaan arvioida muuntamoiden johtolähtöjen kaapelilajien sopivuutta nykyisen kuormituksen kanssa ja autokannan sähköistymisen jälkeen.



Kuva 4.3 Johtolähtöjen suurimmat kuormitusvirrat muuntamolla 1

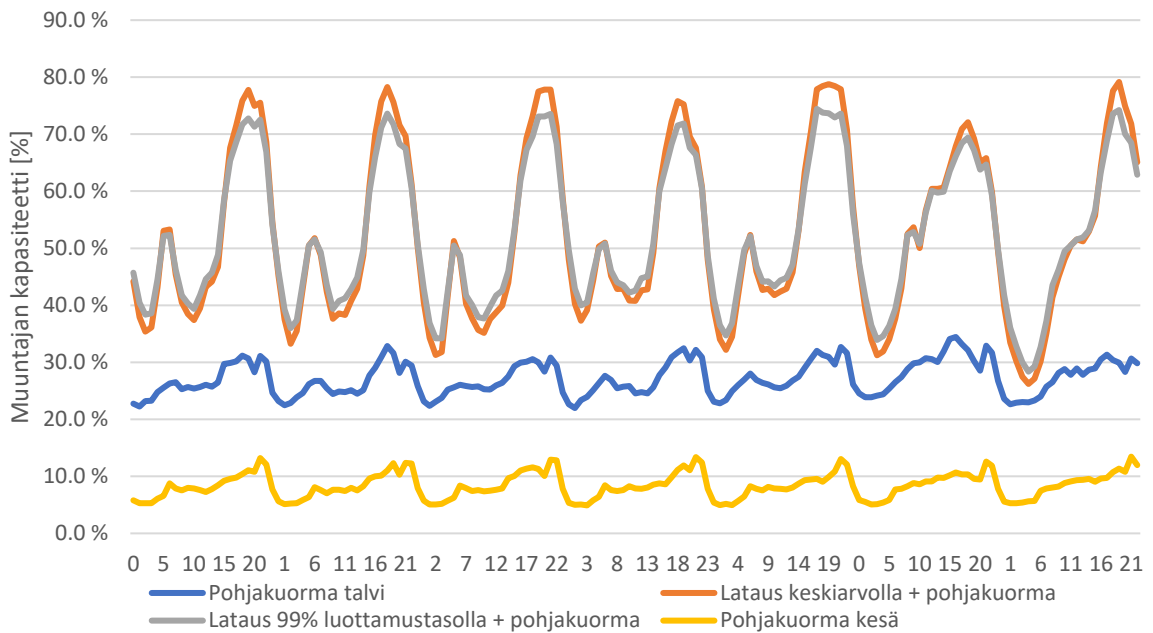


Kuva 4.4 Johtolähtöjen suurimmat kuormitusvirrat muuntamolla 2

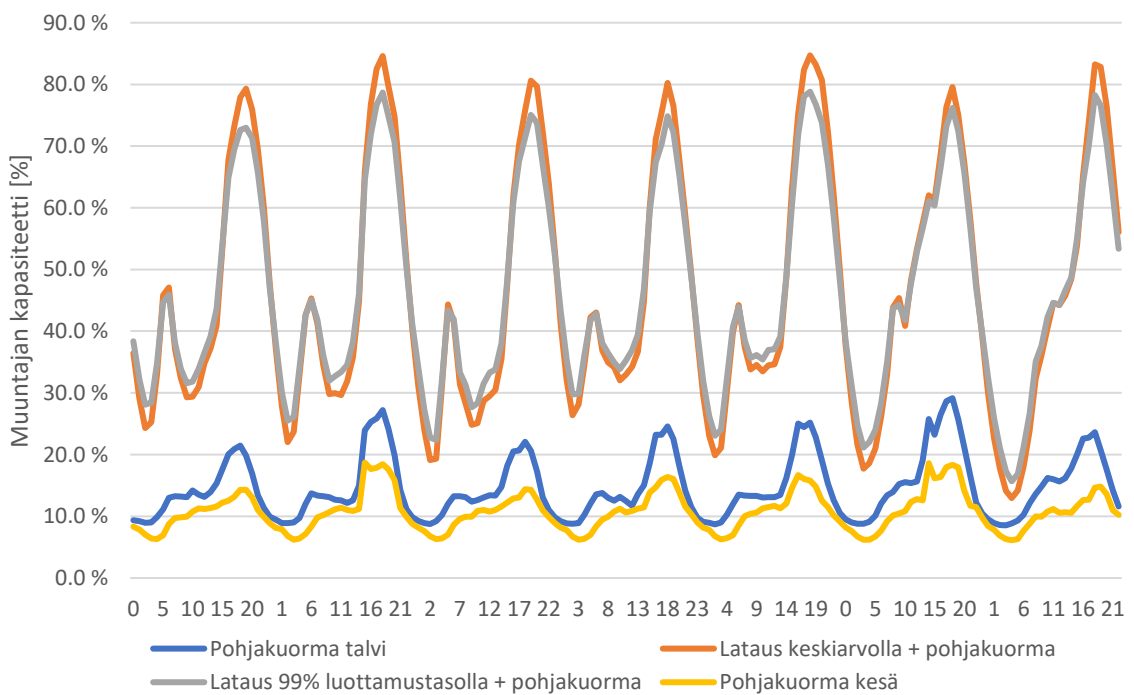
Kuvien 4.3 ja 4.4 perusteella havaitaan, että yhdenkään johtolähdön kaapelien kuormitettavuudet eivät tule vastaan laskennassa käytetyillä arvoilla. On kuitenkin tärkeää huomioida, että esimerkiksi muuntamon 1 johtolähdöillä 6A ja 6B on vain yksi sähkökäyttöpaikka johtolähtöä kohden. Lataustehojakaumaa ei voida soveltaa yksittäisiä sähkökäyttäjää tarkasteltaessa, joten niiden lähtöjen kuormitusvirrat eivät pidä paikkaansa. Sen sijaan molempien johtolähtöjen johtimet kestävät 3x60 A kuormituksen ja sähkökäyttöpaikoilla on 3x25 A pääsulakkeet. Näin ollen myös 6A ja 6B johtolähdöillä kuormitukset pysyvät sallituissa raja-arvoissa.

Muuntamoiden johtolähtöjen tuntikohtaiset kuormitukset summaamalla saadaan jakelumuuntajien tuntikohtaiset kuormitukset. Jakelumuuntajien tuntikohtaisista kuormituksista muodostettiin keskiarvoiset kuormitukset vuoden 2020 kesä- ja talviviikoille erikseen, sekä sähköautokannan kasvun jälkeiset lataustehojen ja 2020 talvikuukausien summien keskiarvoviikkokuvaajat. Kuvien 4.5 ja 4.6 lisäksi muuntajien kuormituksia havainnollistetaan kuvassa 4.7, johon on koottu muuntajien vuoden suurimmat kuormitukset sekä jakelumuuntajien kuormitettavuuden maksimiarvot.

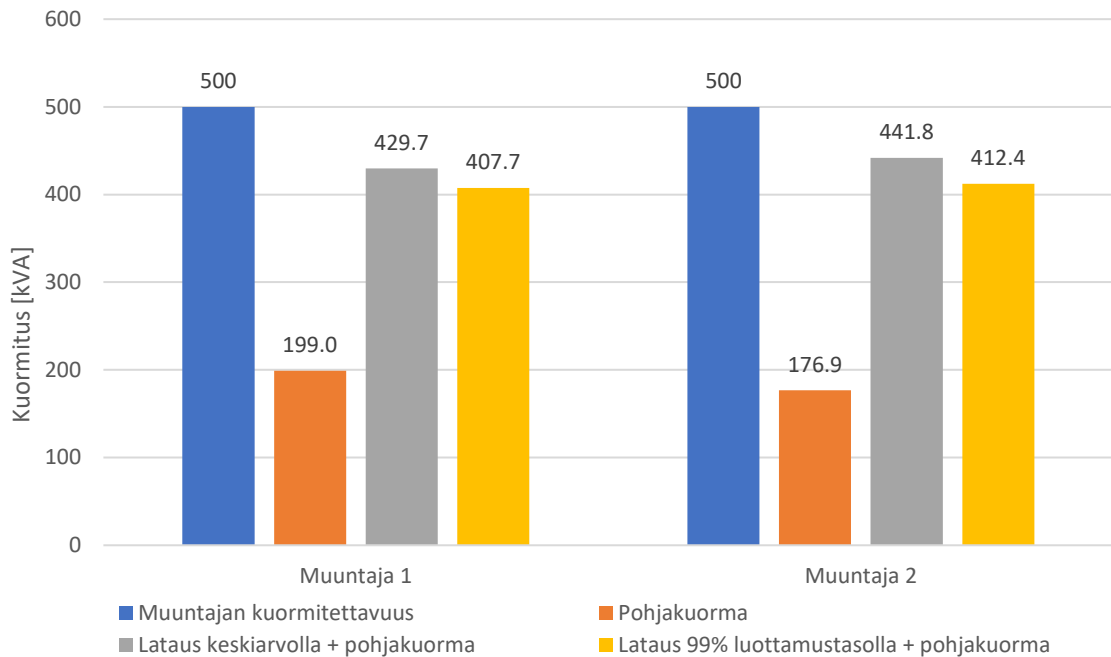




Kuva 4.5 Keskiarvoviikot kellonajoittain muuntamolla 1



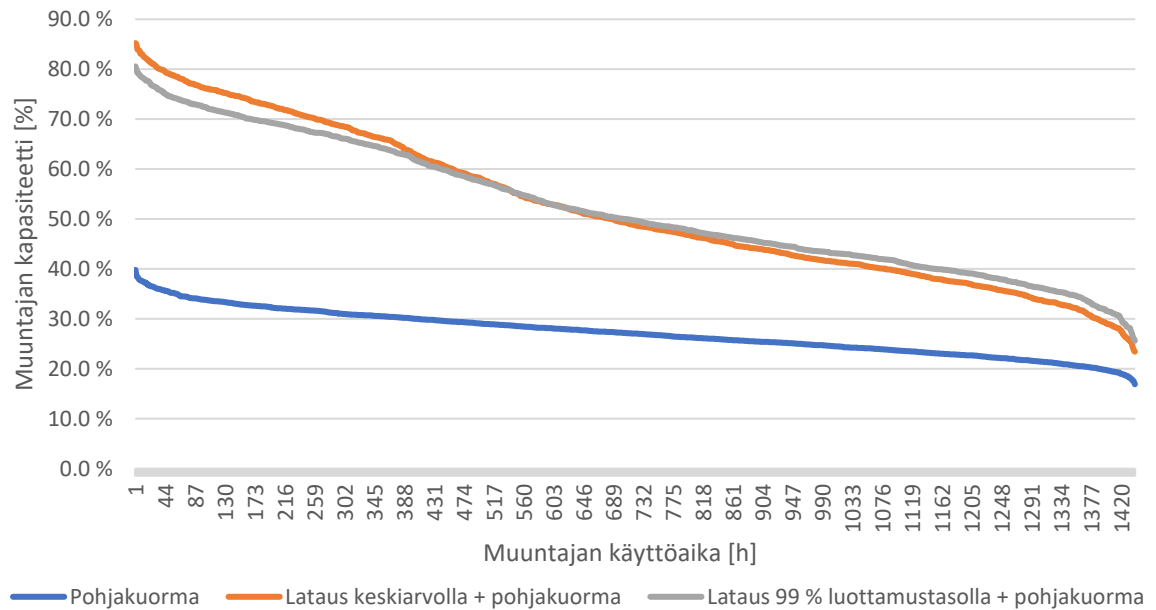
Kuva 4.6 Keskiarvoviikot kellonajoittain muuntamolla 2



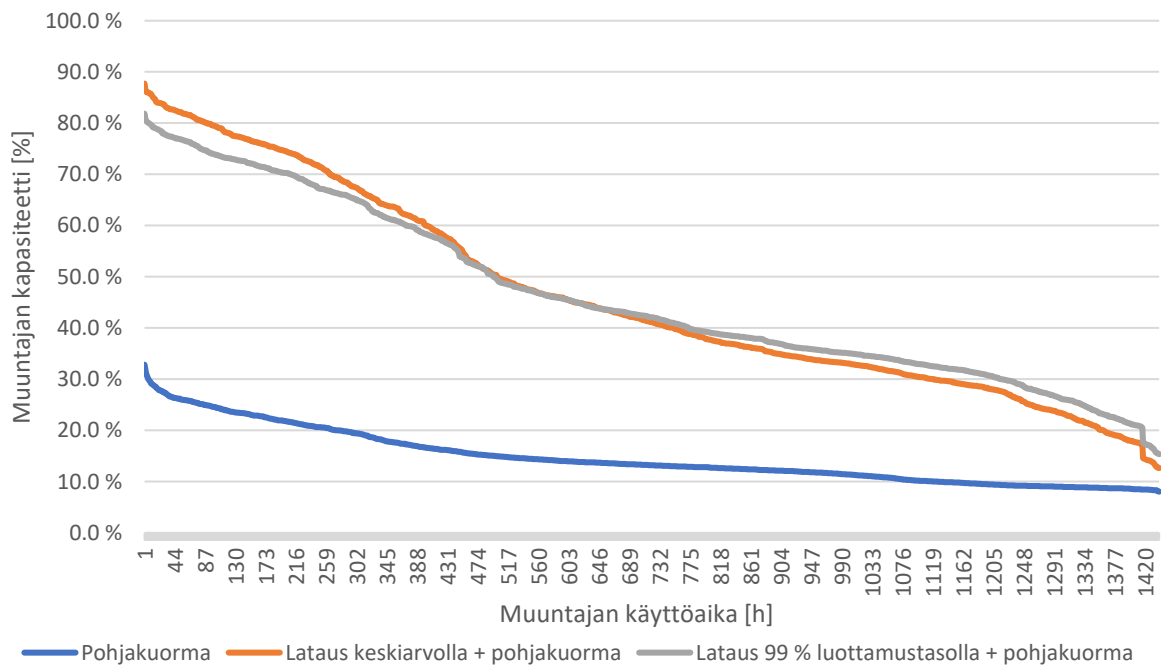
Kuva 4.7 Muuntamojen suurimmat vuoden aikana ilmenevät kuormitukset

Kuvista 4.5 ja 4.6 tarkastelemalla kuvaajia vuoden 2020 keskiarvoisista kesä- ja talviviikkoista havaitaan keskiarvoisen talviviikon kuormitusten olevan merkittävästi kesäviikkoa suuremmat, mikä vahvistaa syyn, jonka takia työssä tarkastellaan erityisesti talvikuukausien aikana tapahtuvan latauksen vaikutuksia. Kuvasta 4.7 voidaan tarkastella muuntajiin kohdistuvia suurimpia vuoden aikana odotettavissa olevia kuormituksia sekä suurimpia vuonna 2020 olleita kuormituksia.

Jakelumuuntajien tammi- ja helmikuuden tuntikohtaisista lataustehoista muodostettiin pysyvyyskäyrät lajittelemalla tuntikohtaiset tehot suuruusjärjestykseen. Muuntamojen pysyvyyskäyrät on esitetty kuvissa 4.8 ja 4.9.



Kuva 4.8 Muuntamon 1 pysyvyyskäyrät tammi- ja helmikuun aineistosta



Kuva 4.9 Muuntamon 2 pysyvyyskäyrät tammi- ja helmikuun aineistosta

Kuvien 4.8 ja 4.9 perusteella voidaan tulkita kuormitusten tasoja ja ylittääkö kuormitus mahdollisesti tietyn arvon ja kuinka kauan tarkasteltava arvo on ollut ylitettynä. Pysyvyyskäyriä tarkastelemalla tässä tapauksessa pystytään tulkitsemaan, että kuormitukset jakelu- muuntajilla pysyvät suurimman sallitun kuormitettavuuden alapuolella.

Työn päätavoitteena on selvittää, kykenevätkö tarkasteltavat kohteet siirtämään sähköautokannan kasvusta aiheutuvan tehonsiirtotarpeen kasvun. Laskentatulosten tarkastelun perusteella johtolähdöillä ei kuormitusten kasvu ole aiheuttamassa tehonsiirtokapasiteetin kannalta ongelmia. Vaikka jakelumuuntajien kuormitukset käyttävät suurimmillaan huomattavasti yli 80 % muuntajien kuormitettavuuksista, niin ne eivät ylitä suurimpia sallittuja arvoja. Näin ollen olemassa olevan pienjänniteverkon tehonsiirtokapasiteetti vaikuttaa riittävän tarkasteltavilla kohteilla, vaikka koko alueen ajoneuvokanta muuttuisi ladattaviksi sähköautoiksi. Näin ollen ei alueella tarvita välittömiä toimenpiteitä sähkönsiirtokapasiteetin puolesta, vaikka ajoneuvokanta alkaisi sähköistymään entistä nopeampaa vauhtia.

Verratessa tuloksia Polatin et al. (2020) hollantilaiseen pilottiverkkoon tekemän tutkimuksen muuntajan kuormitukseen voidaan havaita merkittäviä eroja tämän työn tuloksiin. Hollantilaisessa verkossa havaittiin kuormituksen ylittävän muuntajan kapasiteetin jo sähköautokannan ollessa 30 % kokonaisautokannasta. Tätä Polatin et al. (2020) pilottiverkkoa tarkasteltaessa täytyy kuitenkin huomioida, että vaikka sähköajoneuvojen osuus ajoneuvokannasta on 0 %, niin muuntajalla esiintyy suurimmillaan noin 400 kVA:n kuormia, mikä on yli 60 % muuntajan kapasiteetista. Esimerkiksi tässä kandidaatintyössä tarkasteltavalla muuntamolla 2 kuormitus vuonna 2020 oli korkeimmillaan 176,9 kVA, joka on noin 35 % muuntajan kapasiteetista. Lisäksi hollantilaisen pilottiverkon muuntopiirin alueella on 662 sähkönkäyttöpaikkaa ja 630 kVA:n muuntaja, kun taas muuntamolla 2 on 238 käyttöpaikkaa ja 500 kVA:n muuntaja. Lisäksi kyseessä olevassa tutkimuksessa on arvioitu olevan yksi auto yhtä sähkönkäyttöpaikkaa kohden ja Suomessa kerrostaloasunnoilla Paakkinen et al. (2018) tutkimusraportin mukaan on noin 0,75 ja rivitaloilla noin 1,35 autoa sähkönkäyttöpaikkaa kohden. Muuntamolla 2 on laskennassa oletettu olevan noin 220 sähköautoa ja hollantilaisen pilottiverkon alueella on sähköajoneuvokannan ollessa 30 % 198 sähköautoa. Näin ollen suurimpien tuntikohtaisten pohjakuormien jälkeen pilottiverkossa on kapasiteettia jäljellä noin 0,68 kVA sähköautoa kohden ja muuntamolla 2 noin 1,46 kVA sähköautoa kohden. Tämän pohjalta havaitaan, että tulosten erilaisuudesta osa selittyy pelkästään muuntopiirien alueella esiintyvistä pohjakuormista sekä komponenteista. Lisäksi eroihin tuloksissa vaikuttavat käytetyt lataustehojakaumat, parametreissa tehdyt oletukset ja oletettu vuorokausittainen ajoneuvokohtainen kilometrikertymä.

Tämän työn tulokset ovat suuntaa antavia, eikä niitä pidä pitää varmuudella tulevaisuudessa ilmenevinä totuuksina. Kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä on useita ja päivittäin

vaihtelevia arvoja on mahdotonta ennustaa täysin oikein. Lisäksi työssä jouduttiin oletta-  
maan loisteho mitättömän pieneksi, mikä vaikuttaa hieman tulosten luotettavuuteen. Työssä  
oletetun täysin ohjaamattoman latauksen esiintyminen tulevaisuudessa kokonaisen muunto-  
piirin alueella, jossa sijaitsee kymmeniä tai satoja sähkökäyttöpaikkoja, on myös hyvin epä-  
todennäköistä.

## 5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tämän kandidaatintyön aikana tarkasteltiin kahta ennalta määrättyä muuntopiiriä, sekä muodostettiin arvio muuntajiin ja muuntajien pienjännitelähtöihin kohdistuvista suurimmista kuormituksista ajoneuvokannan muuttuessa täysin sähköiseksi tarkasteltavien muuntopiirien alueella. Lisäksi selvitettiin muuntopiirien tehonsiirtokapasiteetin kannalta oleellisille komponenteille kuormitettavuuden arvot ja verrattiin arvion tuloksia oleellisten komponenttien kuormitettavuuksiin.

Kuormituksista muodostetun arvion perusteella ei ajoneuvokannan sähköistymisen aiheuttama latausteho aiheuta yksinään vuoden 2020 pohjakuorman kanssa tehonsiirtokapasiteetin kannalta ongelmia, vaikka tarkastelussa oletettiin lataus täysin ohjaamattomaksi ja tarkasteltiin suurimpia kylmissä olosuhteissa muodostuvia lataustehoja. Todellisuudessa ajoneuvojen lataaminen ei tule olemaan ainakaan täysin ohjaamatonta, sillä jo nykyisillä kotilataus- asemillakin on tiedonsiirtoväylien ansiosta mahdollista ohjata ajoneuvojen latausta. Lisäksi täysin ohjaamattomassa latauksessa todennäköisesti ainakin isoimmista kerrostaloasuin- teistöissä nykyiset pääsulakekoot tulisivat vastaan ja aiheuttaisivat tarpeen joko liittymäkoon suurentamiselle ja/tai älykkäisiin latausjärjestelmiin siirtymiselle. Näin ollen todellisuudessa lataustehojen huiput leikkautuisivat ja tasoittuisivat hieman paremmin pitkällä tarkastelu- ajanjaksolla.

Täysin ongelmatonta ei ajoneuvokannan sähköistyminen kuitenkaan ole myöskään työssä tarkasteltavien muuntopiirien alueella. Lataustehon ja energiansiirron kasvu aiheuttaa energia- ja tehohäviöitä yhtälöiden 3.1–3.3 mukaisesti sekä jännitteen alenemaa yhtälön 3.5 mukaisesti. Vaikka huipputehonsiirtotarpeen arvioinnissa ei huomioitu jännitteen alenemaa ja energia- ja tehohäviöitä ilmenevät ne kuitenkin todellisessa verkossa. Ne tulevat aiheuttamaan vähintäänkin kustannuksia häviöenergian muodossa ja todennäköisesti etenkin pitkien siirtoyhteyksien päässä olevilla pienillä muuntopiireillä myös jännitteen alenema tulee aiheuttamaan ongelmia. Lisäksi vaikka tarkasteltavien kohteiden komponenttien kuormitettavuudet eivät tulleetkaan vastaan, niin on mahdollista, että työssä tarkastelussa olleiden alueiden saneeraaminen olisi kannattavaa pitkällä aikavälillä jo pelkästään uudempien ja suuremmilla kuormitettavuuksilla varustettujen komponenttien mahdollistaman paremman hyötysuhteen vuoksi.

Sähköautojen ja sähköautonlatauspisteiden yleistymisen nopeuden takia tulevaisuudessa voisi olla hyvä jatkaa tarkastelua sähköautonlatauspisteiden yleistymisellä suuremmassa mittakaavassa. Suuremman muuntopiirien lukumäärän tarkastelu ja pienjännitejakeluverkon lisäksi keskijännitejohtolähtöjen ja mahdollisesti myös sähköasemien päämuuntajien tehonsiirtokykyä voisi olla hyvä tarkastella, sillä sähköajoneuvokannan kasvaessa kotitalouslatauspisteiden lisäksi muun muassa suuria lataustehoja ottavat pikalatausasemat tulevat yleistymään. Lisäksi tarkastelua voisi jatkaa tutkimalla myös sähköautojen latauksen aiheuttamaa jännitteenalenemaa jakeluverkoissa.

## Lähteet

Elovaara, J. & Haarla, J. 2011. Sähköverkot I – Järjestelmätekniikka ja sähköverkon las-  
kenta. Gaudeamus / Otatieto. 78–79, 82–85.

Hao, X., Wang, H., Lin, Z. & Ouyang, M. 2019. Seasonal effects on electric vehicle energy  
consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles.  
Viitattu 5.12.2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119403>

JATO. 2021. EVs outsell diesel vehicles in Europe in August for the first time ever. Viitattu  
1.12.2021. [https://www.jato.com/evs-outsell-diesel-vehicles-in-europe-in-august-for-the-  
first-time-ever/](https://www.jato.com/evs-outsell-diesel-vehicles-in-europe-in-august-for-the-first-time-ever/)

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Gaudeamus Helsinki University  
Press / Otatieto. 11, 19, 28, 34–35, 38–39, 125, 157–158, 168.

Lappeenrannan Energia. 2021. *Yritysesittely*

Liikennefakta. 2021a. Liikenteen kasvihuonepäästöt ja energiankulutus. Viitattu 1.12.2021.  
<https://liikennefakta.fi/fi/ymparisto/liikenteen-kasvihuonekaasupaastot-ja-energiankulutus>

Liikennefakta. 2021b. Ajoneuvomäärät. Viitattu 10.1.2022. [https://liikennefakta.fi/fi/  
ymparisto/mopot-moottoripyorat-ja-mopoautot/ajoneuvomaarat](https://liikennefakta.fi/fi/ymparisto/mopot-moottoripyorat-ja-mopoautot/ajoneuvomaarat)

Motiva. 2020a. Hybridiauto. Viitattu 1.12.2021. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/  
kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/  
autotyypit/  
hybridiauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyypit/hybridiauto)

Motiva. 2020b. Ladattava hybridiauto (pistokehybridi, lataushybridi). Viitattu 1.12.2021.  
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/  
valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyypit/ladattava\\_hybridiauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyypit/ladattava_hybridiauto)

Motiva. 2020c. Täyssähköauto. Viitattu 1.12.2021. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kes-  
tava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyypit/  
tayssahkoauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyypit/tayssahkoauto)

Motiva. 2021. Sähköauton lataustekniikka ja turvallisuus. Viitattu 1.12.2021.  
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/  
valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyypit/sahkoauton\\_lataustekniikka\\_ja\\_turvallisuus](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyypit/sahkoauton_lataustekniikka_ja_turvallisuus)



- OFV. 2021. Bilisalget i september 2021. Viitattu 1.12.2021. <https://ofv.no/bilsalget/bilsalget-i-september-2021>
- Paakkinen, M., Pihlatie, M., Peltola, V. & Pylysy, P. 2018. Sähköautojen kotilataaminen. Viitattu 9.12.2021. [https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/21137015/VTT\\_R\\_02416\\_18.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/21137015/VTT_R_02416_18.pdf)
- Polat, O., Eyuboglu, O. & Gul, O. 2020. Monte Carlo simulation of electric vehicle loads respect to return home from work and impacts to the low voltage side of distribution network. Viitattu 2.12.2021. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01093-5>
- Sesko. 2021. Sähköajoneuvojen lataussuositus 2021. Viitattu 15.12.2021. [https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin\\_aihealueita/sahkoautot\\_ja\\_latausjarjestelmat/lataussuositus](https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/lataussuositus)
- Tikka, V., Kalenius, J., Räisänen, O. & Lassila, J. 2021. Loppuraportti: sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitusaste erilaisissa toimintaympäristöissä. Viitattu 20.12.2021. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-716-7>
- Traficom. 2021. Ajoneuvokannan tilastot. Viitattu 10.1.2022. <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>
- Yle. 2021. Uusien polttomoottoriautojen myynnin loppu lähestyy – Autoala odottaa uusia kovia päästölinjauksia EU-komissiolta pian. Viitattu 13.12.2021. <https://yle.fi/uutiset/3-12014259>