

Antti Laalahti

# SÄHKÖAUTOJEN KOTILATAUKSEN VAIKUTUKSET SÄHKÖNJAKELUVERKON JÄNNITTEEN LAATUUN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Diplomityö  
Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Antti Laalahti: Sähköautojen kotilatauksen vaikutukset sähkönjakeluverkon jännitteen laatuun  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikka  
Toukokuu 2019

---

Sähköautojen määrä kasvaa todennäköisesti tulevaisuudessa huomattavasti. Valtioilla on erilaisia tulevaisuuden tavoitteita sähköautojen osuuden kasvattamisesta liikenteessä. Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää, kuinka sähköautojen kotilatauksen kasvu tulee vaikuttamaan nykyisen kaltaisen sähkönjakeluverkon jännitteen laatuun.

Työ toteutettiin simuloimalla tilannetta verkossa, kun sinne lisätään erilaisia määriä sähköautoja. Sähköautojen määrät saatiin erilaisista tavoitteista niiden lisääntymiselle. Tavoitteina käytettiin Suomen vuoden 2030 tavoitetta, EU:n vuoden 2030 tavoitetta ja EU:n vuoden 2050 tavoitetta. Näistä ensimmäisessä on tavoiteltu pienintä määrää sähköautojen kasvussa ja viimeisessä suurinta määrää. Tarkasteltavana verkkona toimi Pirkanmaalla sijaitseva sähkönjakeluverkko, joka sisälsi kaupungin sisäistä verkkoa ja laajoja haja-asutusalueen verkon osia. Tästä verkosta oli lähtötietoina kuormitustiedot, joihin sähköautojen kuormitus lisättiin erilaisissa simuloinneissa.

Työssä tarkasteltiin simuloimalla, mitä verkossa tapahtuu jakelumuuntajien kuormitukselle, verkon jännitetasoille, jännitteen harmoniselle kokonaissärölle ja jännitteen epäsymmetrialle. Simulaatiot tehtiin kaikille suureille kaikissa tarkasteltavissa tavoitteissa. Vätkyntä käytiin lävitse vain teoriaosuudessa. Tulosten tarkastelussa tutkittiin, missä järjestyksessä eri suureet tulevat aiheuttamaan ongelmia, kun sähköautojen määrä verkossa jatkaa kasvua.

Simulointien tulokset osoittivat, että todennäköisesti ensimmäiset ongelmat tulevat ilmenevän Suomen vuoden 2030 tavoitteen aikaan ja sitä suuremmilla sähköautomäärillä. Silloin ylikuorma jakelumuuntajilla verkossa kasvaa merkittäväksi. Samaan aikaan ongelmia alkavat aiheuttaa sähköautolaturien yliaallot, jotka aiheuttavat jännitteen harmonisen kokonaissärön nopean kasvun. Seuraavaksi ongelmia aiheuttaa todennäköisesti jännitetaso verkossa, kun tarkastellaan EU:n vuoden 2030 tavoitetta ja sitä suurempia sähköautomääriä. Jännitetaso suurimmat ja pienimmät arvot alkavat olla melko kaukana toisistaan osassa verkon solmupisteistä. Tästä voi aiheutua ongelmia asiakkaan liityntäpisteessä. Lisäksi ongelmia aiheutti jännitteen epäsymmetria. Tätä alkaa esiintyä vasta EU:n vuoden 2050 tavoitteen aikaan tai sitä suuremmilla sähköautomäärillä.

Lopuksi arvioitiin, millä korjaustoimenpiteillä pystytään ehkäisemään mainitut ongelmat sähkönjakeluverkossa. Tässä tarkasteltiin, miten verkonylläpitäjän pitäisi reagoida missäkin vaiheessa, kun sähköautojen määrä alkaa kasvaa.

Avainsanat: ennuste, häiriövaikutukset, jännitemuutokset, kotilataus, sähköajoneuvot, sähköautot, sähkönjakeluverkko, sähkönlaatu, tavoite, vaikutukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Antti Laalahti: Impacts of electric vehicles charging on voltage quality in distribution network  
Master's thesis  
Tampere University  
Electrical Engineering  
May 2019

---

The amount of electric vehicles will probably increase greatly in future. States have different goals to increase electric vehicles in traffic. Goal of this thesis was to find out, how the increase of electric vehicles charging at home environment will affect voltage quality in a present-day distribution network.

Computer simulation of a distribution network was used in this study. Network state was simulated using different number of electric vehicles connected to the network. The numbers of electric vehicles were obtained from different scenarios. The used scenarios were Finland's goal to year 2030, EU's goal to year 2030 and EU's goal to year 2050. The increase in electric vehicles was smallest in the first scenario and largest in the last scenario. The target network in this thesis was a distribution network in Finland in Pirkanmaa region. This network contained city areas and large sparsely populated areas. Initial load data was available for this network. Electric vehicles charging data were added in addition to initial data in different simulation scenarios.

The thesis examined what were the impacts of loading to distribution transformers, network voltage levels, total harmonic distortion of voltage and voltage unbalance. All different variables were simulated in every scenario. Voltage flicker was covered only in the theory section. All results were analyzed, and after that it was determined in which order different variables are going to cause problems in the network, when the number of electric vehicles continues to increase.

The results from the simulations indicate that probably first problems start to emerge during Finland's year 2030 goal and with greater numbers of electric vehicles. At this time overload at distribution transformers already rises to significant levels. At the same time problems starts to emerge with harmonics from electric vehicles chargers. This causes fast increase of total harmonic distortion of voltage. Next problem will probably be network voltage level. This will happen at EU's year 2030 goal and with greater numbers of electric vehicles. Here maximum and minimum values of voltage level starts to differ at some nodes. This may cause problems at customer's access point. An additional variable that caused problems was voltage unbalance. This started to occur at EU's year 2050 goal and with greater numbers of electric vehicles.

Lastly, there was discussion how problems above can be solved in a distribution network. In other words, what are the things that a distribution network owner should consider in different situations when the amount of electric vehicles starts to increase in the network.

Keywords: prediction, impacts, voltage increment, charging, electric vehicles, electric cars, distribution network, power quality, goal, effects

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

## ALKUSANAT

Tämän diplomityön tekeminen aloitettiin Tampereen teknillisen yliopiston sähköenergia-tekniikan laboratoriolle vuonna 2017. Se saatiin valmiiksi Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikössä vuonna 2019. Työ oli jatkoa sähköautojen verkostovaikutuksen tutkimuksille, jotka olivat saaneet alkunsa eCharge tutkimusprojektista. Tässä työssä syvennyttiin lisää kyseiseen aihealueeseen. Työ oli mielenkiintoinen ja ennen kaikkea opettavainen projekti. Aikataulu venyi valitettavan pitkäksi ja työ sisälsi useita haasteita. Lopulta vaikeuksista kuitenkin selvitettiin ja samalla sähköautojen maailma tuli todella tutuksi.

Haluan esittää kiitokset Antti Supposelle, josta oli korvaamaton apu työn valmistumisessa. Erityisesti simulointityökaluun liittyvät ongelmat saatiin ratkaistua ainoastaan Antin avustuksella. Usein keskustelumme puhelimessa venyivät virka-ajan ulkopuolelle asti. Haluan esittää kiitokset myös professori Pertti Järventaustalle, joka toimi työn ohjaajana. Häneltä sain aina rakentavaa palautetta työhön liittyen ja ohjausta oikeaan suuntaan, kun sitä vain tarvitsin. Samoin haluan kiittää ystävääni Erkkä Rinnettä siitä avusta ja osaamisesta, mitä hän tarjosi viimeisten virheiden siivoamiseen työstä.

Lopuksi kiitän vielä rakasta puolisoani Ruuttia. Hän jaksoi sinnikkäästi painostaa minua työn tekemiseen silloinkin, kun olin väsynyt ja diplomityö tuntui hyvin kaukaiselta ajatuksesta töiden ja muiden velvollisuuksien ohella.

Tampereella, 22.5.2019

Antti Laalahti

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖAJONEUVOT .....	3
2.1 Hybridiauto .....	3
2.2 Ladattava hybridiauto .....	4
2.3 Hybridiautojen tekniikka .....	4
2.4 Sähköauto .....	6
2.5 Johtumalla lataaminen .....	7
2.5.1 Mode 1 .....	7
2.5.2 Mode 2 .....	8
2.5.3 Mode 3 .....	9
2.5.4 Mode 4 .....	10
2.6 Latauspistokkeet .....	11
2.6.1 Schuko -pistoke .....	11
2.6.2 Kolmivaihepistoke .....	12
2.6.3 Tyyppi 1 .....	12
2.6.4 Tyyppi 2 .....	13
2.6.5 CHAdeMO .....	14
2.6.6 CCS Combo .....	14
2.6.7 Tesla Supercharger .....	15
2.7 Virroitinlataus .....	16
2.8 Langaton lataus .....	17
2.9 Kotilatauksen yleistymisen tulevaisuudessa .....	18
2.9.1 Suomen tilanne ja tavoitteet .....	18
2.9.2 Euroopan unionin tavoitteet .....	19
3. SÄHKÖN LAATUSTANDARDIT .....	21
3.1 Kuormitus .....	21
3.2 Jännitetaso .....	22
3.3 Harmoninen yliaaltojännite .....	23
3.4 Epäsymmetria .....	24
3.5 Välkyntä .....	26
4. VERKOSTOLASKELMAT .....	28
4.1 Ohjelmiston esittely .....	28
4.2 Lähtötiedot autoista .....	28
4.3 Tutkimuksen eteneminen .....	29
4.4 Alkuperäinen tilanne vuonna 2017 .....	33

4.4.1	Kuormitus.....	33
4.4.2	Jännitetaso .....	38
4.4.3	Harmoniset yliaaltojännitteet .....	40
4.4.4	Epäsymmetria.....	40
4.5	Suomen tavoite 2030 .....	41
4.5.1	Kuormitus.....	41
4.5.2	Jännitetaso .....	46
4.5.3	Harmoniset yliaaltojännitteet .....	48
4.5.4	Epäsymmetria.....	48
4.6	EU:n tavoite 2030.....	49
4.6.1	Kuormitus.....	50
4.6.2	Jännitetaso .....	55
4.6.3	Harmoniset yliaaltojännitteet .....	57
4.6.4	Epäsymmetria.....	57
4.7	EU:n tavoite 2050.....	58
4.7.1	Kuormitus.....	59
4.7.2	Jännitetaso .....	64
4.7.3	Harmoniset yliaaltojännitteet .....	66
4.7.4	Epäsymmetria.....	66
4.8	Tilanteiden vertailu.....	67
5.	YHTEENVETO.....	71
	LÄHTEET .....	75
	LIITE A: LATAUSTEHOJEN JAKAUTUMINEN ASIAKASTYYPEILLE.....	81
	LIITE B: TILASTOT LATAUSAJOISTA JA ENERGIOISTA.....	82
	LIITE C: LATAUKSEN SATUNNAISTAMINEN .....	85

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

HEV	Hybridiauto engl. Hybrid electric vehicle
PHEV	Ladattava hybridiauto engl. Plug-in hybrid electric vehicle
BEV	Sähköauto engl. Battery electric vehicle
EV	Tarkemmin määrittelemätön sähköajoneuvo engl. Electric vehicle
E-REV	Engl. Extended Range Electrical Vehicle
REEV	Engl. Range Extended Electrical Vehicle
AC	Vaihtovirta engl. Alternating current
DC	Tasavirta engl. Direct current
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardoimisorganisaatio engl. International Electrotechnical Commission
CHAdEMO	Latauspistoke tyyppi. Lyhenne sanoista CHArge de MOve, engl. move using charge
CCS Combo	Latauspistoke tyyppi. Lyhenne sanoista engl. Combined Charging System (Combo)
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus engl. Electromagnetic compatibility
THD	Harmoninen kokonaissärö engl. Total harmonic distortion
VUF	Jännitteen epäsymmetriakerroin engl. Voltage Unbalance Factor
UIE	IEC:n kumppanuusorganisaatio sähkökäyttöisissä sovelluksissa engl. International Union for Electricity Applications
EPRI	Yhdysvalloissa toimiva voittoa tavoittelematon järjestö, joka suorittaa sähkövoiman tutkimusta. Engl. Electric Power Research Institute
Trafi	Liikenteen turvallisuusvirasto

# 1. JOHDANTO

Sähköautoista julkaistaan nykyään paljon artikkeleita mediassa ja se on aiheena pinnalla, kun puhutaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä tai ilmastonlämpenemisen ehkäisystä. Erityisesti fossiilisia polttoaineita käyttävästä tieliikenteestä halutaan leikata tulevaisuudessa. Sähköautoja pidetäänkin vakavasti otettavana kehityssuuntana polttomoottoriautojen aiheuttamien kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Liikennettä halutaan muuttaa sähköiseen suuntaan tulevaisuudessa, ja siitä on olemassa erilaisia linjauksia ja tavoitteita Suomella sekä Euroopan unionilla. Sähköautojen lisääntyminen ei kuitenkaan ole välttämättä täysin ongelmaton ratkaisu päästöjen vähentämisen kannalta. (Liikennejärjestelmä.fi -portaali 2019)

Tässä diplomityössä keskityttiin tutkimaan sähköautojen lisääntymisen vaikutusta sähköjakeluverkon jännitteen laatuun kotilatauksen osalta. Työ on jatkumoa kansalliselle sähköautolatauksen tutkimusprojektille nimeltä eCharge, jonka yhtenä tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon lisääntynyt sähköautojen latauskuorma aiheuttaa sähkön laatuongelmia nykyisen kaltaisissa sähköverkoissa. Projektin tuloksena syntyi yksi julkaisu ja sähkön laadun laskentatyökalu DSSHarmonix (Supponen et al. 2016). Tässä työssä jatketaan näitä tutkimuksia ja syvennytään lisää sähkön laadun tarkasteluun.

Diplomityön tarkoitus on selvittää kuinka erilaiset tulevaisuuden tavoitteiden sähköautomäärät tulevat vaikuttamaan sähköjakeluverkon jännitteen laatuun. Työ toteutettiin tekemällä useita simulointeja yllä mainitulla laskentatyökalulla erilaisille sähköautojen määrille. Päämääränä oli selvittää, syntyykö verkkoon laatuongelmia ja mitkä laatuongelmat tulevat olemaan kriittisimmät sekä mitkä tulevat ensimmäisenä vastaan, kun sähköautojen määrä lisääntyy. Tarkastelussa oli mukana ylikuormitus, jännitetaso, jännitteen harmoninen kokonaissärö ja jännitteen epäsymmetria. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli uusin tarkasteltava suure, josta ei ole olemassa vielä paljon tutkimusta sähköautojen lataukseen liittyen. Vätkyntä käytiin myös lävitse teoriatasolla. Sitä ei voitu tarkastella simuloimalla, koska simulointityökalua ei oltu suunniteltu siihen.

Työn toisessa osiossa käydään aluksi lävitse perustietoa sähköajoneuvoista, ja niiden teknisiä ratkaisuja. Selvitetään, minkälaisia erilaisia sähköajoneuvoja on olemassa, sekä miten niiden tekniikka vaikuttaa niiden mallintamiseen simuloinnissa. Sen jälkeen tarkastellaan, minkälaisia lataustekniikoita on olemassa sähköajoneuvoille ja mitkä ovat niiden

rajoitteet olemassa olevien standardien puolesta. Osiossa nostetaan esille myös nykyään käytössä olevat erilaiset latausliittimet ja niiden eroavaisuudet. Lopuksi selvitetään erilaiset tavoitteet sähköautojen määrän kasvulle tulevaisuudessa. Tarkastellaan mitä Suomi ja EU on asettanut omiksi tavoitteiksi tulevaisuudessa sähköautojen määrän kasvulle ja minkälaisilla aikaväleillä.

Kolmannessa osiossa tutustutaan sähkön laadun mittareihin. Käydään läpi standardit, jotka määräävät raja-arvoja taajuudelle, jännitetasoille, jännitteen harmoniselle kokonaissärölle, jännitteen epäsymmetrialle ja välkynnälle sähköverkossa. Näitä rajoja käytetään myöhemmin simulointiosuudessa tulosten tulkitsemiseen.

Neljännessä osiossa tutustutaan tarkemmin simulointiohjelmistoon ja simuloitavaan verkkoon. Työssä käytetty esimerkkiverkko sijaitsee Suomessa, Pirkanmaalla. Verkko sisältää kaupungin sisäistä verkkoa ja laajoja haja-asutusalueen verkon osia. Se on varsin kattava alue tarkastelua varten. Osiossa käydään lävitse lähtöarvot simulointeja varten ja tutustutaan simulointien sisältöön. Lopuksi toteutetaan simuloinnit ja tarkastellaan niiden tuloksia.

Viimeisessä viidennessä osiossa on yhteenveto. Siinä tutkitaan tuloksia simuloinneista, jotka on suoritettu erilaisten sähköautomäärien tavoitteille. Lisäksi käydään lävitse, mitkä sähkön laadun mittarit ylittyvät ensimmäisinä standardien määräämien rajojen mukaan. Samoin tarkastellaan, kuinka näihin ylityksiin tulisi reagoida sähköverkon ylläpidon osalta ja mitkä tulevat olemaan ongelmallisimmat suureet.

## 2. SÄHKÖAJONEUVOT

Sähköajoneuvot ovat kulkuneuvoja, jotka toimivat sähköllä perinteisen polttomoottorin sijaan. Tässä osiossa tutustutaan sähköajoneuvoihin pintapuoleisesti ja siihen, miten ne toimivat sekä miten niitä jaotellaan kirjallisuudessa. Tämän työn simuloinneissa ja mallinuksessa käytettyjä sähköautoja esitellään tarkemmin työn verkostolaskelmien yhteydessä diplomityön loppupuolella. Tässä päästään tutustumaan tekniikkaan ja toimintaperiaatteisiin.

Sähköauto on sähköenergialla toimiva ajoneuvo. Sähköautojen tyyppejä on useita ja niiden jaottelussa käytetään monia erilaisia tapoja. Niitä määritellään omiin ryhmiinsä niiden toimintatavan ja käyttötarkoituksen mukaan. Välillä voi olla vaikea sanoa suoraan, mihin kategoriaan mikäkin ajoneuvo sijoittuu, sillä rajat ovat häilyviä ja uusia ajoneuvoja tulee koko ajan markkinoille. Eri lähteet kirjallisuudessa lyhentävät kategorioita eri tavoin ja kokonaisuuden hahmottaminen voi olla työlästä. (Biomeri Oy 2009; Ristikartano et al. 2014; Karttunen et al. 2015)

Työssä sähköajoneuvoista käytetään seuraavia termejä:

- Hybridiauto engl. Hybrid electric vehicle (HEV)
- Ladattava hybridiauto engl. Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)
- Sähköauto engl. Battery electric vehicle (BEV)
- Tarkemmin määrittelemätön sähköajoneuvo engl. Electric vehicle (EV).

(Biomeri Oy 2009; Nikowitz 2016)

### 2.1 Hybridiauto

Hybridiautoissa voimanlähteitä on kaksi, yleensä polttomoottori ja sähkömoottori. Polttomoottori voi käyttää polttoaineena nestemäistä tai kaasun muodossa olevaa ainetta, joka toimii päävoimanlähteenä. Tyypillisesti polttomoottori toimii bensiinillä tai dieselöljyllä. Polttomoottori pyörittää generaattoria, joka tuottaa energiaa auton akuille. Sähkömoottori ottaa taas energiansa akuista. Hybridiauto käyttää molempia moottoreita liikkumiseen riippuen ajotilanteesta. Polttomoottoria pyritään käyttämään mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella ja vähäpäästöisesti. Sähkömoottori avustaa tarvittaessa polttomoottoria suuremmissa kiihdytyksissä, jolloin polttomoottori toimii hyvällä hyötysuhteella. Toisaalta pelkkää sähkömoottoria voidaan käyttää mahdollisimman paljon, jolloin sillä ajetaan lyhyitä ja vähän nopeutta vaativia matkoja, kun taas polttomoottoria hyödynnetään pitkissä ja suurilla nopeuksilla vaativissa siirtymissä. Hybridiauton sähkömoottorin akkuja

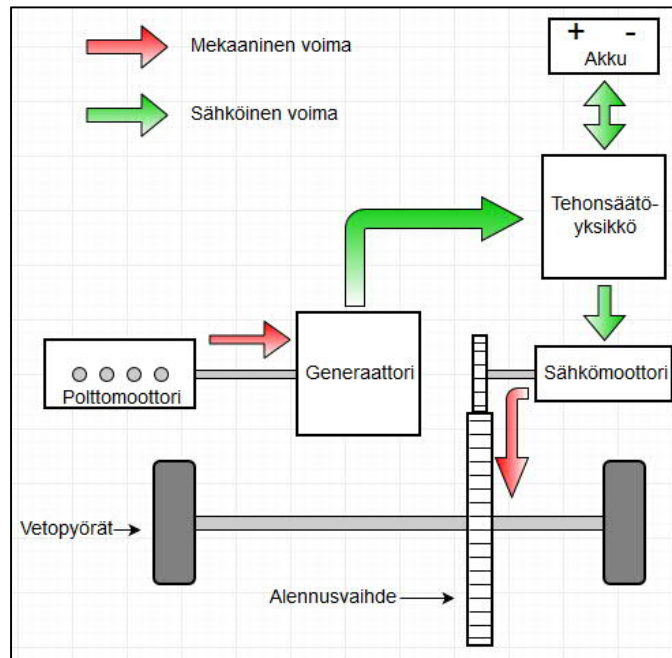
ladataan polttomoottorilla ja auton jarrutusenergia otetaan talteen akkuihin. Hybridiautoa ei ole mahdollista ladata erikseen ulkopuolisesta lähteestä. Puhtaasti sähköllä kuljettava matka hybridiautolla voi olla noin 23–56 km. Tyypillisesti matka on lähempänä alkupään lukemaa. (Biomeri Oy 2009; Nikowitz 2016; Onori et al. 2016)

## 2.2 Ladattava hybridiauto

Ladattava hybridiauto toimii osin hieman eri tavoin kuin edellä esitelty hybridiauto. Ladattavan hybridiauton akkuihin voidaan ladata virtaa auton ulkopuolisesta lähteestä. Yleensä ulkopuolisena lähteenä toimii sähköverkko. Ladattava hybridiauto käyttää ensin akusta virtaa ajoon tiettyyn pisteeseen asti. Kun akun varaus on vähentynyt riittävästi, alkaa auto toimia samalla tavalla kuin tavallinen hybridiauto. Idea ladattavassa hybridiautossa on, että auto toimii suurimman osan ajasta pelkällä sähköllä ja polttoaine toimii vain reservinä ja mahdollistaa myös pidemmän matkustamisen. Auto voi käyttää polttomoottoria avuksi myös nopeisiin kiihdytyksiin. Puhtaasti sähköllä voidaan matkustaa ladattavalla hybridiautolla noin 23–80 km. Kokonaismatka polttomoottorin kanssa voi olla keskimäärin jopa 1200 km. Ladattavista hybridiautoista on myös olemassa eri valmistajilla omia jatkokehitelmiä, joilla matkan pituutta pystytään jatkamaan. Näissä polttomoottori toimii käytännössä ainoastaan sähkön tuottamiseen, jos akku tyhjenee ajon aikana. Näin lisätään niin sanottua sähköllä ajettua matkaa. Näitä ovat muun muassa engl. Extended Range Electrical Vehicle (E-REV) ja engl. Range Extended Electrical Vehicle (REEV). Tämän tyyppisillä tekniikoilla voidaan sähköllä ajoa pidentää 130 → 160 km tai 240 → 300 km. Todellisuudessa pidennys tapahtuu kuitenkin polttoaineen avulla. Kaikkien hybridien sisäinen tekniikka voidaan myös jakaa useampaan osaan, josta kerrotaan seuraavassa kappaleessa lisää. (Biomeri Oy 2009; Nikowitz 2016; Onori et al. 2016)

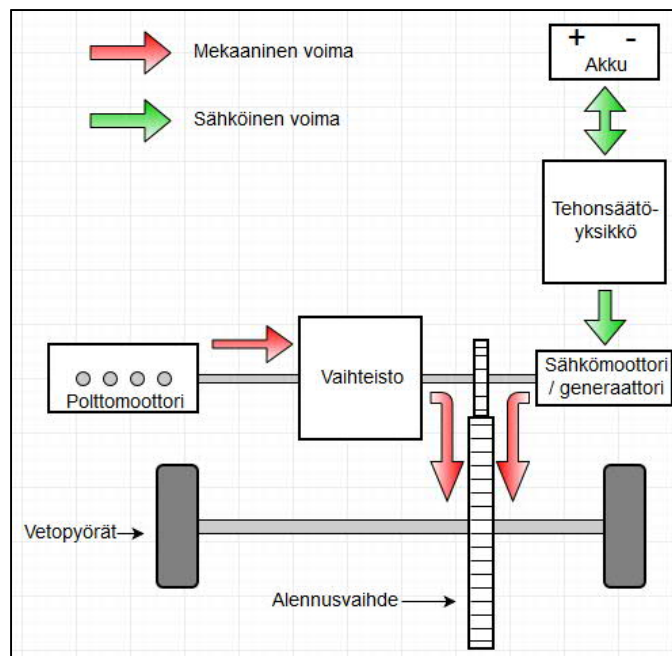
## 2.3 Hybridiautojen tekniikka

Sarjahybridissä polttomoottori tuottaa kaiken energian liikkumiseen. Se tuottaa energian, jolla ladataan akkuja ja pyöritetään sähkömoottoria. Sähkömoottori ottaa energiansa akuista sekä polttomoottorilta ja pyörittää lopulta auton renkaita. Auton sähkömoottori voi käyttää samaan aikaan akusta tulevaa ja polttomoottorilta tulevaa energiaa renkaiden pyörittämiseen. Kuvassa 1 on sarjahybridin kaaviokuva. (Biomeri Oy 2009; Onori et al. 2016; Toyota 2017)



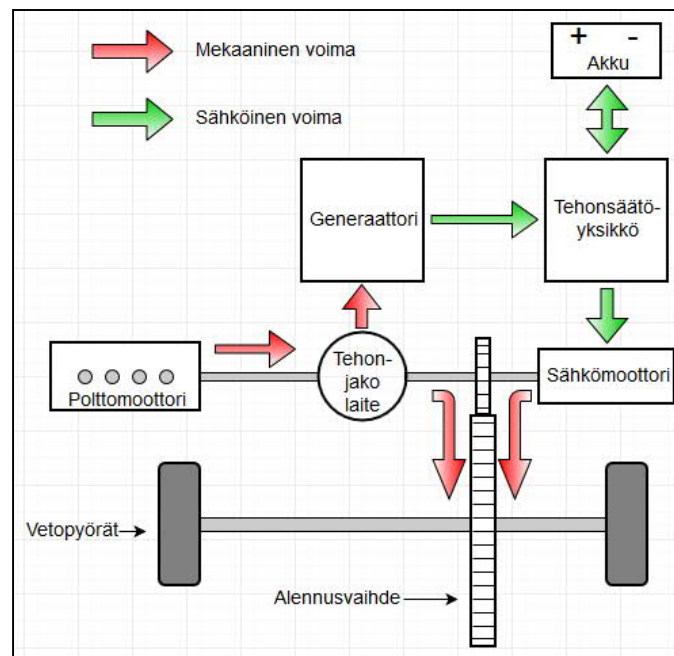
**Kuva 1.** Sarjahybridin kaaviokuva. (Muokattu lähteestä Toyota 2017)

Rinnakkaishybridissä pääosan energiasta tuottaa edelleen polttomoottori. Molemmat moottorit ovat mekaanisesti kiinni toisissaan ja yhteydessä pyöriin. Sähkömoottori avustaa polttomoottoria tarvittaessa. Tässä tekniikassa sähkömoottoria ei voida käyttää samaan aikaan vedon tuottamiseen renkaille, kun se lataa akkuja. Kuvassa 2 on rinnakkaishybridin kaaviokuva. (Biomeri Oy 2009; Onori et al. 2016; Toyota 2017)



**Kuva 2.** Rinnakkaishybridin kaaviokuva. (Muokattu lähteestä Toyota 2017)

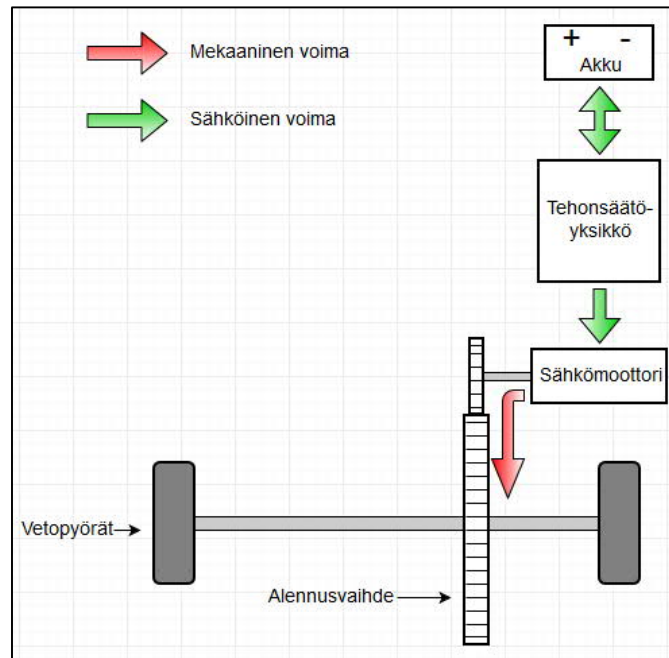
Lisäksi on sarja- ja rinnakkaishybridien yhdistelmiä, joissa on molemmat ominaisuudet. Tämä voidaan toteuttaa kahdella kytkimellä, jotka muokkaavat voimansiirtoa halutuksi. Tilanteen mukaan järjestelmä kytketään joko sarjahybridiksi tai rinnakkaishybridiksi. Tästä on olemassa myös Toyotan toteuttama versio, jossa käytetään erityistä tehoa jakavaa laitetta (engl. power split device). Tässä tekniikassa pystytään yhdistämään sarjahybridien ja rinnakkaishybridien hyvät puolet käyttöön samaan aikaan. Autoa voidaan siis ajaa sähkömoottorilla ja polttomoottorilla samaan aikaan, sekä tuottaa sähköä akulle samalla. Autoa voi käyttää pelkästään sähkömoottorilla hitaissa nopeuksissa ja samalla myös ladata akkua. Nopeammilla nopeuksilla ja kovissa kiihdytyksissä molemmat moottorit voidaan ottaa nopeasti käyttöön tukemaan toisiaan. Sähkövarauksen ollessa vähissä voidaan käyttää pelkkää polttomoottoria. Kuvassa 3 on sarja- ja rinnakkaishybridiyhdistelmän kaaviokuva. (Biomeri Oy 2009; Onori et al. 2016; Toyota 2017)



**Kuva 3.** Sarja- ja rinnakkaishybridiyhdistelmän kaaviokuva. (Muokattu lähteestä Toyota 2017)

## 2.4 Sähköauto

Sähköauto (BEV) on ainoa täysin puhdas sähköauto, joka toimii pelkästään sähköllä ilman muita avustavia voimanlähteitä. Sähköautossa ei siis ole ollenkaan polttomoottoria ja kaikki voima tuotetaan pelkästään sähkömoottorilla. Akut ovat isommat kuin hybrideissä, koska niistä pitää riittää virtaa koko ajan. Akkuja ladataan ulkoisesta sähköverkosta, kun auto ei ole ajossa. Nykyisissä malleissa sähköä riittää 90–520 km ajomatkoille. Kuvassa 4 on sähköauton kaaviokuva. (Biomeri Oy 2009; Nikowitz 2016; Siemens 2017a)



**Kuva 4.** Sähköauton kaaviokuva. (Muokattu lähteistä Siemens 2017a ja Toyota 2017)

## 2.5 Johtumalla lataaminen

Sähköautoja voidaan ladata monella eri tavalla sähköverkosta ja tässä kappaleessa käydään lävitse näitä lataustekniikoita ja niihin liittyviä standardeja. Lataustekniikat vaihtelevat sen mukaan käytetäänkö vaihtovirtaa engl. alternating current (AC) vai tasavirtaa engl. direct current (DC). Käytettävien vaiheiden määrä vaikuttaa vaihtovirralla ladattaessa lataustehoon ja tasavirralla tehoon vaikuttaa, millä tavalla sähköä syötetään sähköautolle. Liittimille ja johdoille on myös omat vaihtoehdonsa.

Kansainvälinen sähköalan standardoimisorganisaatio International Electrotechnical Commission (IEC) on tuottanut standardin IEC 61851-1:2017 Ed. 3, jossa on määritelty yleiset vaatimukset sähköajoneuvojen latausjärjestelmille johtumalla tapahtuviin latauksiin. Standardi määrittelee ajoneuvon sisäänrakennettuja tai ulkoisia latauslaitteita aina 1000 V asti vaihtojännitteellä ja 1500 V tasajännitteellä. Standardissa määrätään neljä eri lataustapaa (engl. mode), joilla sähköajoneuvoja voidaan ladata. Seuraavaksi käydään lävitse nämä. (IEC 2017)

### 2.5.1 Mode 1

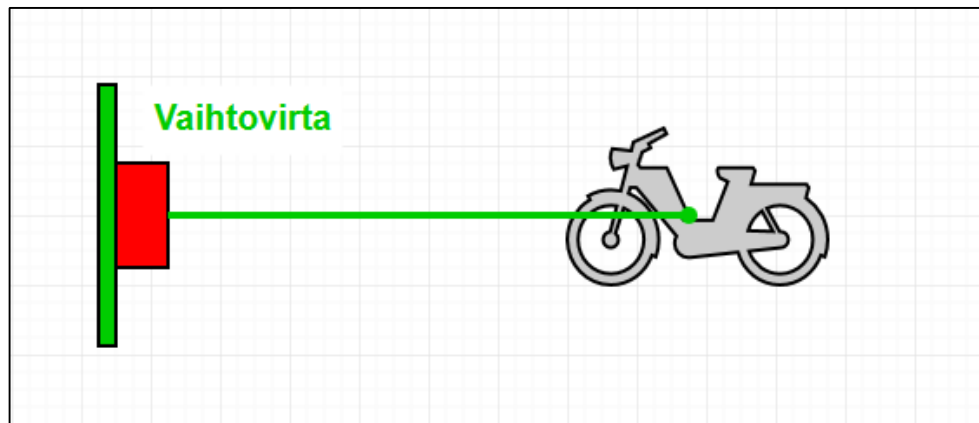
Mode 1 käyttää tavallista pistotulppaa ja kaapelia, jolla sähköajoneuvo kytketään suoraan vaihtosähköverkkoon. Ajoneuvon päässä oleva pistoke voi olla ajoneuvokohtainen. Liittimissä ja kaapelissa ei kulje mukana erillistä ohjaussignaalia, vaan lataus tapahtuu

ilman älyä. Molemmissa liittimissä ja kaapelissa on kuitenkin kuljettava suojamaadoitusjohto. Suurimmat sallitut virrat ja jännitteet eivät saa ylittää seuraavia arvoja:

- Yksivaiheinen vaihtovirta 16 A ja 250 V
- Kolmivaiheinen vaihtovirta 16 A ja 480 V

Näiden lisäksi eri maissa voi olla maakohtaisia rajoituksia, jotka rajoittavat vielä tiukemmin Mode 1 käyttöä. Nämä löytyvät tarkemmin standardista, eivätkä vaikuta Suomessa. (IEC 2017)

Tämä lataustapa on tarkoitettu kevyiden sähköajoneuvojen lataamiseen. Käytännössä Suomessa tämä tarkoittaa sähköpolkupyörien, -skoottereiden ja -ruohonleikkurien lataamista tavallisesta 230 V kotitalouspistorasiasta, jossa on enintään 30 mA vikavirta-suoja. Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva kevyen sähköajoneuvon lataamisesta. (SESKO 2017a)



**Kuva 5.** Mode 1 kevyiden sähköajoneuvojen lataaminen. Lataus tapahtuu tavallisesta pistorasiasta, tavallisella kaapelilla ja ilman ohjaussignaalia. (Muokattu lähteestä Schneider Electric 2017a)

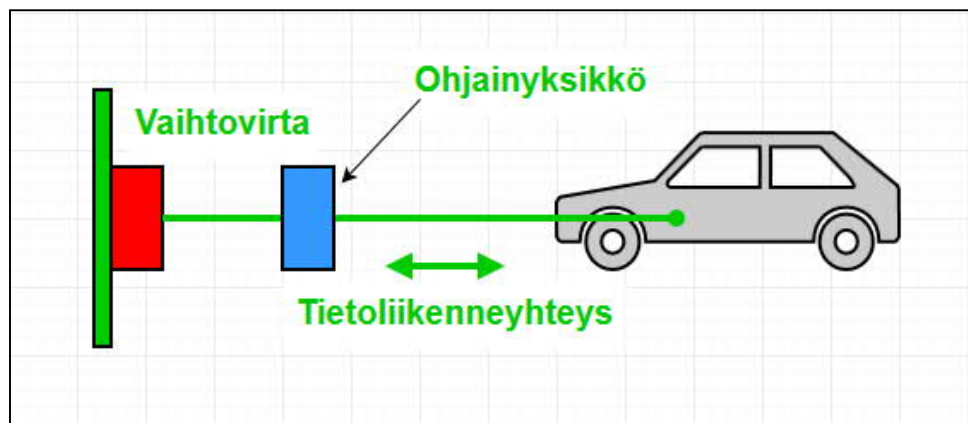
## 2.5.2 Mode 2

Mode 2 käyttää tavallista pistotulppaa, jolla sähköajoneuvo kytketään suoraan vaihtosähköverkkoon. Kaapelissa on kuitenkin kuljettava mukana ohjaussignaali ja siinä on oltava mukana henkilökohtainen suojaus sähköiskujen varalta. Ajoneuvoon kytkettävä pistoke on oltava vaadittuja ominaisuuksia varten suunniteltu. Pistotulpassa, pistokkeessa ja kaapelissa on kuljettava suojamaadoitusjohto. Laitteiston sähköverkon puoleiset osat voidaan myös asentaa seinään suojakotelossa. Suurimmat sallitut virrat ja jännitteet eivät saa ylittää seuraavia arvoja:

- Yksivaiheinen vaihtovirta 32 A ja 250 V
- Kolmivaiheinen vaihtovirta 32 A ja 480 V

Näiden lisäksi eri maissa voi olla maakohtaisia rajoituksia, jotka rajoittavat vielä tiukemmin Mode 2 käyttöä. Nämä löytyvät tarkemmin standardista, eivätkä vaikuta käyttöön Suomessa. (IEC 2017)

Tätä lataustapaa kutsutaan hitaaksi lataukseksi. Käytännössä Suomessa sähköauton laturia syötetään tavallisesta 230 V kotitalouspistorasiasta. Sähköauto kytketään valmistajan omalla kaapelilla, josta löytyy suojaus- ja ohjausominaisuudet kaapelin keskelle sijoitetusta ohjausyksiköstä sekä autoon sopiva pistoke. Lataustehot pysyvät yleensä alle 2000 W tavallisissa pistorasioissa. Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva sähköajoneuvon hitaasta lataamisesta. (SESKO 2017a)

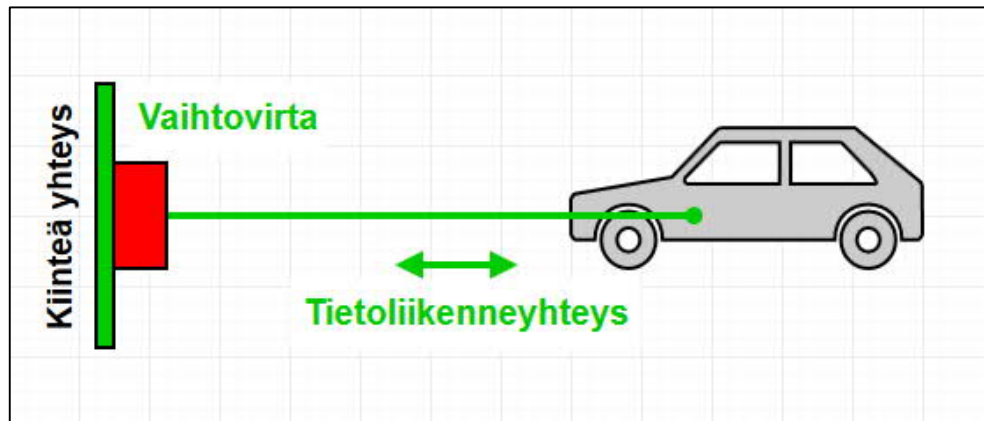


**Kuva 6.** Mode 2 hidas lataus. Lataus tapahtuu tavallisesta pistorasiasta erityisellä latauskaapelilla, joka sisältää ohjainyksikön josta menee ohjaussignaali autolle. (Muokattu lähteestä Schneider Electric 2017b)

### 2.5.3 Mode 3

Mode 3 on tarkoitettu sähköajoneuvon latauslaitteelle, joka on kiinteästi kytketty vaihtosähköverkkoon. Latauskaapeli on tätä tapaa varten suunniteltu ja ohjaussignaali kulkee sitä pitkin latauslaitteistosta ajoneuvolle asti. Suojamaadoitus kulkee latauslaitteen pistokkeesta ajoneuvon pistokkeeseen. (IEC 2017)

Tätä lataustapaa kutsutaan peruslataukseksi ja se on suunniteltu nimenomaan sähköauton tavallista lataamista varten. Lataus suoritetaan toimenpidettä varten erityisesti suunnitellusta latauslaitteesta, auton tai laturin omalla kaapelilla. Latausvirrat voivat olla 6–63 A ja tehot 1,4–43 kW. Ohjaussignaali varmistaa, että liittimet on turvallisesti kytketty auton ja latauslaitteen välillä. Virtaa voidaan myös siirtää molempiin suuntiin tarvittaessa. Kuvassa 7 on esitetty periaatekuva sähköajoneuvon peruslataamisesta. (SESKO 2017a)

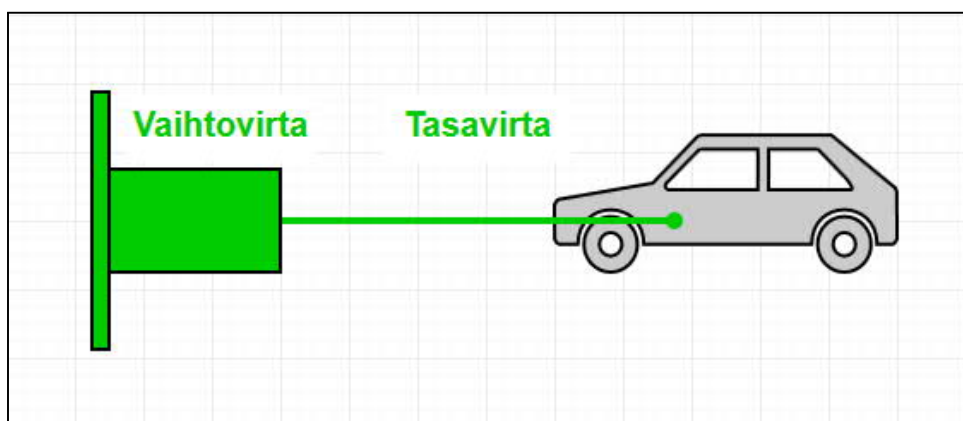


**Kuva 7.** Mode 3 peruslataus. Lataus tapahtuu erityisestä latauslaitteesta, joka on kiinteästi kytketty sähköverkkoon ja erityisellä latauskaapelilla. Latauslaitteen ja auton välillä kulkee ohjaussignaali. (Muokattu lähteestä Schneider Electric 2017c)

#### 2.5.4 Mode 4

Mode 4 on tarkoitettu sähköajoneuvon tasavirtaa käyttävälle latauslaitteistolle, joka on kytketty tasajännite- tai vaihtojänniteverkkoon. Latauslaite voi olla kytketty joko kiinteästi jakeluverkkoon tai kaapelilla ja liittimellä. Tyypillisesti kytkentä on aina tehty kiinteästi. Ajoneuvon latauskaapeli on tätä tapaa varten suunniteltu ja ohjaussignaali kulkee sitä pitkin latauslaitteistosta ajoneuville asti. (IEC 2017)

Tätä lataustapaa kutsutaan tehoolataukseksi. Ajatuksena on syöttää sähköajoneuville suurta virtaa tasasähköllä. Latauskaapeli on kiinteästi kiinni latauslaitteistossa. Suurin latausvirta on 200 A ja tehot voivat olla 22–200 kW. Kuvassa 8 on esitetty periaatekuva sähköajoneuvon tehoolataamisesta. (SESKO 2017a; Vesa 2019)



**Kuva 8.** Mode 4 tehoolataus. Lataus tapahtuu erityisestä latauslaitteesta, joka syöttää tasajännitettä erityisellä latauskaapelilla. Latauslaitteen ja auton välillä kulkee ohjaussignaali. (Muokattu lähteestä Schneider Electric 2017d)

## 2.6 Latauspistokkeet

Tässä kohdassa käsitellään latauksessa käytettäviä latausasemienpistokkeita sekä siivutaan myös tavallisia kotitalous- ja teollisuuspistokkeita, joita voidaan käyttää sähköautojen lataamiseen. Seuraavat standardit määrittelevät sähköajoneuvon lataamiseen käytettäviä pistokkeita (SESKO 2017b):

- IEC 62196-1 Sähköauton pistokytin (yleiset turvallisuusvaatimukset)
- IEC 62196-2 Sähköauton vaihtosähköpistokytin (mittalehdet)
- IEC 62196-3 Sähköauton pikalatauspistokytin d.c. ja a.c./d.c. (mittalehdet)

Pistokkeita on olemassa useita erimallisia, jotka kilpailevat keskenään. Mitään täysin yhtenäistä mallia ei ole olemassa, mutta suurin osa noudattaa edellä mainittuja tai omia kansallisia standardeja. Eri latausasemien ja autojen valmistajat käyttävät tuotteissaan tiettyjä pistokkeita ja ne vaihtelevat myös aiemmin käsiteltyjen latausnopeuksien mukaan. Tilanne on varsin haastava ymmärtää ja vaatii tutustumista aiheeseen. Pistokkeiden lataustehot kehittyvät myös nopeammin kuin latausstandardit pystyvät määrittelemään. Tämän huomaa pistokkeiden läpi kulkevissa teoreettisissa maksimitehoissa. Nämäkin muuttuvat jatkuvasti, ja ne mainitaan eri suuruisiksi eri lähteissä, joten maksimitehoihin on suhtauduttava pienellä varauksella. Samoin latausstandardit ovat jatkuvan kehitystyön alla ja mahdollistavat siten suurempia tehoja.

### 2.6.1 Schuko -pistoke

Schuko on Suomessa ja Euroopassa tavallinen kotitalouksista löytyvä yksivaiheinen liitin, jota voidaan käyttää sähköautojen lataamiseen. Sitä ei ole suunniteltu eikä tarkoitettu sähköautojen tarvitsemille tehomäärille, mutta sitä voidaan käyttää Mode 1 ja Mode 2 kanssa hitaaseen lataamiseen. Schukon pistokkeen jännite on 230 V ja maksimivirta on 16 A. Suomessa vuonna 2016 rajoitettiin uusien myytävien sähköautojen latausvirta 8 A:iin pitkäaikaisessa latauksessa. Taustalla vaikuttaa se, että sähköautojen vaatimassa hyvin pitkäkestoisessa latauksessa, 16 A voi kuumentaa liikaa liittimiä ja johtoja. Osa latausjohtojen valmistajista ja autojen valmistajista mahdollistaa kuitenkin hetkellisesti 13 A tai jopa 16 A virran käyttämisen. Tässä tekniikassa käytetään johdoissa lämpötilanturia, joka rajoittaa virtaa tarvittaessa. 13 A virralla latausteho on 3 kW. Kuvassa 9 on esitetty Schuko -pistoke. (Linja-aho 2016; SESKO 2019a)



*Kuva 9. Schuko -pistoke. (SomnusDe 2010)*

## 2.6.2 Kolmivaihepistoke

Tavallisesta teollisuudessa käytetystä kolmivaiheisesta pistokkeesta käytetään myös nimiä Mennekes ja Commando. Näitä voi löytyä kotitalouksista yksittäisinä kappaleina. Pistoketta voidaan käyttää sähköautojen lataamiseen myös 16 A virralla kolmivaiheisena ja 400 V jännitteellä. Tämä kuitenkin vaatii yleensä kolmannen osapuolen latauslaitteen, joka osaa hyödyntää kolmivaiheista virtaa (tällaisia on esimerkiksi JUICE BOOSTER 2 ja NRGkick -laturit.) Pistoketta voidaan käyttää Mode 1 ja Mode 2 kanssa hitaaseen lataamiseen, mutta kuitenkin tehokkaammin kuin Schuko -liitintä. Maksimilatausteho pistokkeesta on 11 kW. Kuvassa 10 on esitetty kolmivaihepistoke. (Duponchee 2015; Juice Technology AG 2017; NRGkick 2017)



*Kuva 10. 400V ja 16 A kolmivaihepistoke. (Muokattu lähteestä Dmitry G 2014)*

## 2.6.3 Tyyppi 1

Tyyppin 1 pistoke tunnetaan myös nimillä J1772 ja SAE J1772. Sitä käytetään yksivaiheisella vaihtovirralla lataamiseen. Liittimen kautta on mahdollista syöttää 80 A virtaa, mutta autossa oleva laturi määrittelee kuinka suurella virralla akkuja voi ladata. Suomessa on yleisesti käytössä 16 A latausvirta, jolloin tehoksi saadaan 3,7 kW. Pistoketta pystyy siis

käyttämään lataamiseen Mode 3:en lataustavalla. Tyypin 1 pistoketta käytetään yhdysvaltalaisissa ja japanilaisissa sähköautoissa. Pistoketta käytetään siis pääosin näillä alueille. Kuvassa 11 on esitetty tyypin 1 pistoke. (Plugit Finland Oy 2017; JET Charge 2019)



**Kuva 11.** Tyypin 1 SAE J1772 pistoke. (Muokattu lähteestä Hicks 2012)

## 2.6.4 Tyypin 2

Tyypin 2 pistoke tunnetaan myös nimillä IEC 62196 ja Mennekes. Sitä voidaan käyttää vaihtovirralla lataamiseen yksivaiheisena tai kolmivaiheisena. Liittimen kautta on mahdollista syöttää 63 A virtaa, mutta autossa oleva laturi määrittelee kuinka suurella virralla akkuja voi ladata. Suomessa tyypillisesti tyypin 2 pistokkeella varustettu ladattava hybridi-auto lataa yksivaiheisena 16 A virralla. Jotkut sähköautot taas voivat ladata jopa kolmivaiheisena 32 A virralla. Pistoke pystyy siis lataamaan Mode 3 lataustavalla. Tyypin 2 pistoketta käytetään eurooppalaisissa sähköajoneuvoissa ja se on standardi julkisissa latauspisteissä Suomessa ja Euroopassa. Kuvassa 12 on esitetty tyypin 2 pistoke. (Plugit Finland Oy 2017; JET Charge 2019)



**Kuva 12.** Tyypin 2 pistoke. (Muokattu lähteestä Sladen 2017)

### 2.6.5 CHAdeMO

CHAdeMO on lyhenne sanoista CHArge de MOve (engl. move using charge). Pistoke on IEC 62196 standardin mukainen tyypin 4 pistoke, mutta tunnetaan paremmin markkinanimeltään CHAdeMO. Tämä pistoke on tarkoitettu teholataukseen ja sitä käytetään tasavirralla lataamiseen. Nykyiseksi jatkuvaksi lataustehoiksi CHAdeMO-kotisivuilla ilmoitetaan 100 kW ja huipputehoiksi 150–200 kW. Tulevaisuudessa teho on tarkoitus nostaa 350–400 kW:iin. Pistoketta voidaan käyttää lataamiseen Mode 4:n lataustavalla. CHAdeMO on japanilaisten autovalmistajien yhteinen liitin tyyppi ja sitä käytetään kansainvälisesti muun muassa seuraavan merkkinisissä autoissa: Nissan, Mitsubishi, Toyota. Kuvassa 13 on esitetty CHAdeMO-pistoke. (Plugit Finland Oy 2017, SolvingEV 2017; CHAdeMO 2019; JET Charge 2019)



*Kuva 13. CHAdeMO pistoke. (Muokattu lähteestä C-CarTom 2011)*

### 2.6.6 CCS Combo

CCS Combo on lyhenne sanoista Combined Charging System (Combo). Tämä pistoke on tarkoitettu teholataukseen tasavirralla. Pistokkeessa on kuitenkin tausta-ajatuksena yhdistää aiemmin mainitut vastaketyypit yhdeksi vastakkeeksi. Tämä on kuitenkin ongelmallista, koska maailmalla on erilaisia sähköverkkoja, joissa on erikokoiset perusjännitteet ja erilaiset vaihejärjestelmät. Tästä syystä myös CCS Combo -pistokkeita on lopulta olemassa kahta erilaista. Toinen on tarkoitettu Yhdysvaltojen ja Japanin alueille, toinen taas Euroopan alueelle. Toisessa yhdistyy teholataus tasavirralla ja tyypin 1 yksivaiheinen peruslataus. Toisessa taas yhdistyy teholataus tasavirralla ja tyypin 2 yksi- tai kolmivaiheinen peruslataus. Pistokkeiden ero näkyy käytännössä liittimien määrässä. Standardi IEC 62196-3 sallii tehot nykyään jopa 200 kW:iin asti. Nämä pistokkeet pystyvät siis lataamaan Mode 3:lla ja Mode 4:llä. Tulevaisuudessa standardia ollaan muokkaamassa siten, että latauskaapeliin voitaisiin lisätä jäähdytys, jolloin CCS Combos huippulataustehot voisivat olla jopa 350 kW. Standardi on suunniteltu olevan valmis vuonna

2019. Tätä pistoketyyppiä käyttävät kansainvälisesti muun muassa: Volkswagen, BMW, Ford ja Hyundai. Kuvassa 14 on esitetty molemmat CCS Combo -pistokkeet. (Plugit Finland Oy 2017; JET Charge 2019; Vesa 2019)



**Kuva 14.** Yhdysvaltoihin ja Japaniin suunnattu CCS Combo pistoke vasemmalla ja Euroopan alueelle suunnattu CCS Combo pistoke oikealla. (Muokattu lähteistä Biontologist 2016 ja Sladen 2017)

### 2.6.7 Tesla Supercharger

Tesla on yritys, joka on keskittynyt valmistamaan sähköautoja. Tesla on kehittänyt oman tehollausjärjestelmänsä, Tesla Supercharger, jossa ei tarvita erillistä omaa pistoketta. Lataaminen onnistuu Teslan tyyppin 2 pistokkeella kyseisestä asemasta, mutta toimii vain Teslan autojen kanssa. Teslan sähköautossa on vastake johon sopivat Teslan oma tyyppin 2 pistoke ja tavallinen tyyppin 2 pistoke. (JET Charge 2019)

Ajatuksena on, että tyyppin 2 pistokkeesta käytetään kahta olemassa olevaa johdinta syöttämään tasavirtaa autolle. Näin tehonsiirto saadaan nostettua korkeammalle tasolle tavallisella pistokkeella. Teslan tyyppin 2 pistoke voi siirtää tavallisesti 120 kW lataustehoa sähköautoon. Lähitulevaisuudessa tämä on kuitenkin kerrottu nostettavan 145 kW:iin. Teslan uusimman V3 Supercharger -mallin on ilmoitettu pystyvän lataamaan jopa 250 kW:n teholla. Tämä tieto julkaistiin maaliskuussa 2019. Teslan pistoke toimii sekä Mode 3:lla että Mode 4:llä. Kuvassa 15 on esitetty Teslan tyyppin 2 pistoke. (Zap-Map 2017; JET Charge 2019; Tesla 2019)



*Kuva 15. Teslan tyyppin 2 pistoke, jolla voidaan ladata myös tasavirtaa. (Muokattu lähteestä Hadhuey 2015)*

## 2.7 Virroitinlataus

Joukkoliikenteessä, kuten linja-autoissa, on tarvetta todella nopealle lataukselle lyhyessä ajassa. Linja-autoihin on kehitetty virroittimeen perustuvia latausjärjestelmiä, joilla tämä onnistutaan toteuttamaan. Linja-autot ovat luonnostaan raskaita ja kuluttavat paljon virtaa ajossa. Samalla kuitenkin kuljettava matka ei ole niin pitkä kuin henkilöautolla. Reitit ovat myös ennalta määrättyjä, ja niihin on helppo varautua. Nämä latausjärjestelmät jakautuvat pääosin kolmen tyyliin järjestelmiin. Ensimmäiset ovat pysäkeille rakennettuja latauspisteitä, toiset ovat linja-autojen mukana kulkevia järjestelmiä ja kolmannet ovat hitaita latausjärjestelmiä. (Siemens 2017b)

Pysäkeille rakennetut järjestelmät on tarkoitettu todella suurilla tehoilla lataamiseen hyvin nopeasti. Virroitin nostetaan linja-auton katolta latauslaitteeseen tai lasketaan katolta linja-auton päälle. Järjestelmä lataa autoon tarvittavan määrän tehoa muutamissa minuuteissa. Tämän jälkeen auto pystyy kulkemaan tarvittavan reitin seuraavalle pysäkille, jossa on latauspiste. Latausteho voi olla tasajännitteellä jopa 150–600 kW. (Siemens 2017b)

Mukana kulkevat järjestelmät on tarkoitettu käytettäväksi kaupungeissa, joissa on jo valmiiksi olemassa tasajännitekiskot. Tällaiset voi olla rakennettu kaupunkiin raitiovaunulle tai johdinautolle. Linja-auton varauksen ollessa matala voi kuski nostaa virroittimen kiinni johtimiin ja ladata autoa ajon aikana. Lataustehot eivät ole kovin suuria, mutta latausta voi tehdä helposti vauhdissa. Tehot ovat tasajännitteellä 60–120 kW:n luokkaa esimerkiksi Siemensin järjestelmissä. Auton reitti voi kulkea osaksi alueilla, joissa kiskoja ei ole. Tällöin auto käyttää ladattua energiaa akuista. Kuvassa 16 on esitetty kaksi virroittimilla toteutettua latausratkaisua. (Siemens 2017b)



**Kuva 16.** Linja-auton latausasema pysäkillä vasemmalla ja linja-auton mukana oleva latausjärjestelmä oikealla. (Muokattu lähteistä Ywchow 2010 ja darkweasel94 2012)

## 2.8 Langaton lataus

Langaton lataus on toiselta nimeltään induktiolataus. Se tarkoittaa sähkömagneettiseen induktioon perustuvaa lataustapaa, jossa energia siirtyy langattomasti kelasta toiseen, kuten tavallisten muuntajien sisällä tapahtuisi. Syöttävän puolen vaihtovirta kulkee kelan lävitse, jolloin kela muodostaa ympärilleen muuttuvan magneettikentän. Vastaanottava kela sijaitsee muuttuvan magneettikentän vaikutuspiirissä ja sen sisällä alkaa kulkea vaihtovirta. Syöttävän puolen kela sijaitsee laturin päässä ja on fyysisesti maassa olevassa levyssä. Vastaanottavan puolen kela sijaitsee auton pohjassa olevassa levyssä. Auto ajetaan laturin levyn päälle, jolloin kelat ovat toistensa vaikutuspiirissä. Langattoman latauksen teknologia voidaan jakaa kahteen osaan, paikallaan tapahtuvaan lataukseen ja dynaamiseen lataukseen. Tämän hetkiset ratkaisut keskittyvät pääosin paikallaan tapahtuvaan lataukseen, mutta tulevaisuudessa dynaamista latausta voidaan mahdollisesti toteuttaa, vaikka ajettaessa moottoriteillä. Langattoman latauksen turvallisuusvaatimukset on kirjattu standardiin IEC 61980. (Fisher et al. 2014; FleetCarma 2017; SESKO 2019b)

Langatonta latausta voidaan käyttää henkilöautojen ja linja-autojen kanssa. Lataus langattomasti tapahtuu huomommalla hyötysuhteella kuin johdollinen lataaminen. Tämä johtuu siitä, että häviöt kasvavat, kun kelojen etäisyys toisistaan kasvaa tai kelojen suunta ei ole optimaalinen. Tehot ovat myös pienempiä kuin johdollisessa lataamisessa. Tyypillisesti lataustehot henkilöautoilla ovat luokkaa 3,7–22 kW. Linja-autoille on testattu liikenteessä hetkellisesti 120 kW:n lataustehoa linja-auton pysähtyessä pysäkillä. Prototyypeillä raskaalle liikenteelle on kuitenkin saatu jopa 250 kW:n lataustehoja. (Conductix-Wampfler 2012; Fisher et al. 2014; FleetCarma 2017; Qualcomm 2017)

## 2.9 Kotilatauksen yleistymisen tulevaisuudessa

Tässä kohdassa tarkastellaan, minkälaisia tavoitteita sähköautojen yleistymiselle on tällä hetkellä olemassa. Tilannetta tarkastellaan pääasiallisesti Suomen sisällä. Mukaan on kuitenkin otettu myös laajempia tavoitteita kattavamman tilannekuvan saamiseksi. Tällä tavalla voidaan arvioida, kuinka paljon kotilataus tulevaisuudessa lisääntyy.

Suurin vaikuttava tekijä sähköautojen yleistymiseen on akkujen hinta. Koska akut ovat kalliita, sähköautojen hinta on huomattavasti suurempi kuin perinteisten polttomoottoriautojen. Akkuteknologian kehittyessä myös akkujen kustannuksia saadaan jatkuvasti painettua alaspäin. Samalla akkujen energiatiheys kasvaa, jolloin sähköautoilla voidaan kulkea yhdellä latauksella pidempiä matkoja. Tulevaisuudessa polttomoottoriautojen ja sähköautojen hinnat lähestyvät toisiaan. Hintojen on ennustettu kohtaavan vuonna 2025. Kulutuksen puolesta sähköautolla on tällä hetkellä jo huomattavasti edullisempaa ajaa kuin polttomoottoriautolla. (IEA 2017; Virta 2018)

### 2.9.1 Suomen tilanne ja tavoitteet

Liikenteen turvallisuusviraston (Trafi) mukaan 31.12.2017 oli Suomessa yhteensä 1 449 liikennekäytössä olevaa sähköhenkilöautoa ja 210 liikennekäytössä olevaa sähköpakettiautoa. Yhteensä sähköautoja (BEV) oli siis 1 659 kappaletta. Näistä autoista 122 oli rekisteröity Pirkanmaan alueelle. Trafin mukaan Pirkanmaan alueella oli 31.12.2017 koko autokanta laskettuna yhteensä 283 823 kappaletta autoja. Tähän lukuun sisältyvät vain henkilöautot, pakettiautot, linja-auto ja erikoisautot. Ulkopuolelle jäävät moottoripyörät, mopot, kevyet nelipyörät, nelipyörät, moottorikelkat, traktorit, moottorityökoneet ja perävaunut. Näistä autoista tarkasteltavan verkon alueella oli pinta-alan verraten ja arvioiden sekä Trafin tilastoihin tukeutuen noin 2,2 %. (Trafi 2017a; Trafi 2017b)

Olettaen, että sähköautot jakautuvat samalla tavalla kuin koko autokanta, niin tällöin tarkasteltavan verkon alueella olisi noin 2 sähköautoa vuoden 2017 lopulla. Tämäkin voi olla arvioitu yläkanttiin, koska todennäköisesti sähköautot ovat keskittyneet suurempiin kaupunkeihin, eikä haja-asutusalueelle. Näistä lukemista puuttuvat muut sähköllä toimivat ajoneuvot, kuten työkoneet ja moottoripyörät, mutta todennäköisesti näiden osuus on niin pieni, että se ei vaikuta ratkaisevasti kokonaismääriin. Suomessa olevista ladattavista hybrideistä ei ollut mahdollista saada työhön tilastotietoa vuodelta 2017. Esimerkiverkosta saadut tiedot ovat kuitenkin melko ajantasaiset, joten nämä alkutilanteen kaikkien sähköajoneuvojen määrät on jo huomioitu tulevissa laskelmissa kuormituksen lähtötilanteessa.

Suomessa Työ- ja elinkeinoministeriö on julkaissut asiakirjan nimeltä ”Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030”. Asiakirjassa esitetään tavoite Suomen sisällä sähköajoneuvojen määrän kasvuille. Asiakirjan mukaan sähköautoja, ladattavia hybridejä ja vetyautoja pitäisi olla vuonna 2030 Suomessa yhteensä 250 000. Vetyautoja ei tässä julkaisussa tarkemmin määritellä. Tyypillisesti ne kuitenkin toimivat polttokennolla, joka tuottaa vedystä ja hapesta sähköä akulle sekä sähkömoottorille (Kortelainen 2017). Tästä saadaan laskettua kohtuullisen vertailukelpoinen luku sähköautoista ja ladattavista hybrideistä tulevaisuudessa. Oletetaan jälleen, että Suomen sisäinen ajoneuvokanta jakautuisi samalla tavalla vuonna 2030 kuin vuonna 2017, eikä määrä kasvaisi huomattavasti. Suomessa oli vuoden 2017 lopulla yhteensä 3 099 566 ajoneuvoa. Näihin määriin sisältyvät henkilöautot, pakettiautot, kuorma-autot, linja-autot ja muut erikoisautot. Mukana on myös samanlaiset sähköajoneuvot. Kaikista ajoneuvoista Pirkanmaalle oli rekisteröity 283 823 kappaletta. (Trafi 2017b; Työ- ja elinkeinoministeriö 2017)

Tämä tarkoittaa, että kaikista Suomen ajoneuvoista noin 9,2 % sijaitsisi Pirkanmaan alueella. Lukumääränä tämä tarkoittaisi Pirkanmaalle vuoden 2030 tavoitteen mukaan noin 22 892 sähköautoa, ladattavaa hybridiautoa ja vetyautoa. Tarkasteltavan verkon alueella olisi edelleen noin 2,2 % ajoneuvoista, joka olisi noin 503 sähköautoa, ladattavaa hybridiautoa ja vetyautoa. Tämä on hyvä arvio pelkästään sähköautoista ja ladattavista hybridiautoista vuonna 2030, kun ajatellaan verkon laskentaa.

## 2.9.2 Euroopan unionin tavoitteet

Euroopan komissio on vuonna 2011 julkaissut asiakirjan nimeltään ”Valkoinen kirja, Yhdenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma – Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää.” Asiakirjassa yhdeksi tavoitteeksi mainitaan, että ”Tavanomaisia polttoaineita käyttävien autojen käyttö puolitetaan kaupunkiliikenteessä vuoteen 2030 mennessä; ne poistetaan kaupungeista asteittain vuoteen 2050 mennessä; suurissa kaupunkikeskuksissa saadaan vuoteen 2030 mennessä aikaan pohjimmiltaan hiilidioksidivapaa kaupunkilogistiikka.” (Euroopan komissio 2011) Tätä voidaan käyttää myös ennusteena tulevasta kehityksestä tietyin ehdoin. Oletetaan, että autojen kokonaismäärä ei tule muuttumaan radikaalisti vuoteen 2030 mennessä. Tällöin puolet vuoden 2030 autokannasta olisi muita kuin polttomoottorilla toimivia. Voidaan tehdä yksinkertaistus ja olettaa, että vuonna 2030 karkeasti puolet autoista olisi sähköautoiksi tai ladattaviksi hybrideiksi luokiteltavia. Tässä määrässä on luonnollisesti mukana myös muita autoja kuin sähköautoja, kuten esimerkiksi jo aiemmin mainittuja vety-

autoja. Viimeistä osaa tavoitteesta, joka koskee suurkaupunkeja, ei voida pitää realistisena tarkasteltavan verkon osalta. Lisäksi Euroopan komissio on myöhemmin julkaissut asiakirjan nimeltään ”Commission staff working document, The implementation of the 2011 White Paper on Transport ‘Roadmap to a Single European Transport Area – towards a competitive and resource-efficient transport system’ five years after its publication: achievements and challenges.” Tässä asiakirjassa tarkastellaan tilannetta viisi vuotta myöhemmin Valkoisen kirjan julkaisun jälkeen. Asiakirjassa todetaan, että edellä mainittuja tavoitteita ei pystytä suoraan mittaamaan, koska tarvittavia indikaattoreita tai dataa ei ole vielä saatavilla. Asiakirjassa korjataan, että asetettuja tavoitteita olisi pidettävä ennemmin vertailuarvoina kuin vaadittuina tavoitteina. (Euroopan komissio 2011; European commission 2016)

Näitä Euroopan komission laatimia tavoitteita voidaan kuitenkin verrata samalla tavalla käsiteltävän verkon alueeseen kuin kotimaisia ennusteita. Pirkanmaalla oli siis edelleen vuoden 2017 lopulla rekisteröity 283 823 ajoneuvoa. Oletetaan, että tästä määrästä puolet olisi sähköautoja ja ladattavia hybridejä vuonna 2030, niin kuin edellä kuvatut Euroopan komission tavoitteet sanelevat. Sähköautoja ja ladattavia hybridejä olisi Pirkanmaalla tällöin noin 141 911 kappaletta. Tarkasteltavan verkon alueella ajoneuvoista olisi edelleen noin 2,2 %, jolloin verkon alueella olisi karkeasti 3 157 kappaletta sähköautoja ja ladattavia hybridejä. Tästä saadaan huomattavasti suurempi määrä kuin mitä Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisussa oli ilmoitettu. Lisäksi, jos tarkastellaan vuotta 2050, jolloin oletetaan, että kaikki autot olisivat sähköautoja ja ladattavia hybridejä, saadaan vielä massiivisempi määrä. Tällöin Pirkanmaalle rekisteröidyistä 283 823 autosta sijaitsisi tarkasteltavan verkon alueella jälleen 2,2 % autoista, eli yhteensä 6 316 sähköautoa ja hybridiäutoa.

Tähän on koottu tiivistelmä lähtötilanteesta ja eri tavoitteista. Koska verkon simuloinnissa ja laskennassa tarvitaan selkeitä numeroita ladattavien sähköautojen määrän kasvusta tulevaisuudessa, on ne siirretty tähän helpommin tarkasteltavaksi. Taulukossa 1 on esitetty ennusteet sähköautojen määrän kasvulle tarkasteltavan verkon alueella eri vuosina. Näitä tullaan käyttämään myöhemmin työn simuloinneissa.

Taulukko 1. *Sähköautot ja ladattavat hybridit tarkasteltavassa verkossa.*

Tavoite	Vuosi 2017	Vuosi 2030	Vuosi 2050
Suomi	2	503	-
EU	-	3157	6316

## 3. SÄHKÖN LAATUSTANDARDIT

Tässä osiossa tutustutaan sähköverkkoihin liittyviin laatustandardeihin ja verkolle asetettuihin vaatimuksiin. Täysin ideaalisessa verkossa aaltomuodot ovat virheettömiä siniaaltoja ja tuotannon sekä kulutuksen suhde on tasapainossa. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan aina ole. Seuraavaksi tarkastellaan jakeluverkon eri ominaisuuksia ja kuinka paljon ne saavat poiketa määritetyistä arvoista. Myöhemmin seuraavissa kappaleissa käydään lävitse, millä tavoin sähköautojen lataaminen vaikuttaa jakeluverkon ominaisuuksiin.

Näitä suureita määrittää Suomessa standardi SFS-EN 50160:2010 yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkönn jänniteominaisuudet. Tämä on suoraan otettu Suomen standardiksi eurooppalaisesta EN 50160:2010 -standardista. Siinä määritellään jännitteen ominaisuudet pien-, keski- ja suurjännitteisen vaihtosähkönn jakeluverkoissa asiakkaan liittymispisteessä normaaleissa käyttöolosuhteissa. Lisäksi eurooppalaisessa standardisarjassa EN 61000 on määritelty sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) ja päästörajat. Näiden määritelmien tunteminen auttaa arvioimaan myöhemmin lopullisten laskujen ja simulointien tuloksia työn loppupuolella. (Mäkinen 2017)

### 3.1 Kuormitus

Sähköverkossa kulutuksen ja tuotannon pitää olla yhtä suuria koko ajan. Epätasapaino vaikuttaa verkon taajuuteen pyörivien koneiden kautta. Näitä ovat tehoa tuottavat generaattorit verkossa. Taajuus on globaali suure, eli se on verkossa joka puolella aina saman suuruinen. Mikäli kulutusta on enemmän kuin tuotantoa, alkavat pyörivät koneet verkossa hidastua ja taajuus verkossa laskea. Jos taas tuotanto on suurempaa kuin kulutus, alkavat pyörivät koneet pyöriä nopeammin, jolloin taajuus verkossa alkaa nousta. Taajuuden muutoksia tarkkaillaan jatkuvasti. Verkossa on kiinni taajuusohjattua käyttöreserviä ja taajuusohjattua häiriöreserviä, joilla voidaan lisätä tai vähentää tehon tuotantoa taajuuden muuttuessa automaattisesti. Näiden lisäksi on nopeaa häiriöreserviä, joka pitää ottaa manuaalisesti käyttöön. Kuormitusta voidaan myös ajaa alas, jos kulutusta on liian paljon tuotantoon nähden. (Bastman 2014a)

Standardi SFS-EN 50160:2010 määrittelee nimellistaajuuden seuraavasti: ”Jakelujännitteen nimellistaajuuden tulee olla 50 Hz. Normaaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuuden keskiarvo mitattuna 10 s aikaväliltä tulee olla välillä

- Yhteiskäyttöverkoissa  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  99,5 % vuodesta ja  $50 \text{ Hz} + 4 \%$  /  $- 6 \%$  100 % ajasta.
- Erillisverkoissa  $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$  95 % viikosta ja  $50 \text{ Hz} \pm 15 \%$  100 % ajasta.” (Mäkinen 2017)

Tässä on koottu selvennyksen vuoksi standardin määräämät raja-arvot taajuudelle. Ne on esitetty taulukossa 2

Taulukko 2. Verkon taajuuden raja-arvot

10 s ajanjakson keskiarvo	Minimitaajuus [Hz]	Maksimitaajuus [Hz]
Yhteiskäyttöverkot 99,5 % vuodesta	49,5	50,5
Yhteiskäyttöverkot 100 % ajasta	47	52
Erillisverkot 99,5 % viikosta	49	51
Erillisverkot 100 % ajasta	42,5	57,5

### 3.2 Jännitetaso

Jännitteeseen jakeluverkossa vaikuttaa pätötehon ja erityisesti loistehon määrä. Loistehoa tuottavat komponentit verkossa nostavat jännitettä ja loistehoa kuluttavat komponentit taas laskevat jännitettä. Loistehoa ei kuitenkaan kannata siirtää verkon johtoja pitkin pitkiä matkoja, koska se vähentää pätötehon siirtokapasiteettia johdolla. Johdoilla on tarkoituksenmukaista siirtää pääosin pätötehoa ja kompensoida loistehoa siellä, missä sitä tarvitaan. Loistehoa kuluttavat rinnakkaisreaktorit, ylikuormittavalla teholla käyvät johdot, alimagnetoidut tahtikoneet, epätahtikoneet, muuntajat, tyristorisillat, diodisillat ja kuormitukset yleisesti. Erityisesti sähköautojen lataamiseen käytetään taajuusmuuttajia ja tehoelektroniikkaa, joka kuluttaa loistehoa ja näin laskee jännitettä, jos loistehon kompensointi ei ole kunnossa verkossa. (Bastman 2014b)

Standardi SFS-EN 50160:2010 määrittelee jännitetason vaihtelun seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, pois lukien keskeytysjaksot, jännitetason vaihtelut eivät saisi ylittää  $\pm 10 \%$  nimellisjännitteestä  $U_n$ . Tapauksissa, joissa jakeluverkkoa ei ole liitetty yleiseen siirtoverkkoon tai erityisillä syrjäseutujen verkon käyttäjillä jännitevaihtelun ei tulisi ylittää  $+ 10 \%$  /  $- 15 \%$  nimellisjännitteestä,  $U_n$ . Verkon käyttäjiä tulisi informoida näistä vaihteluista.” (Mäkinen 2017)

Jännitetason testimenetelmä määritellään standardin SFS-EN 50160:2010 mukaan seuraavasti: ”· kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksoilta mitatuista keskiarvoista 95 % tulee olla välillä  $U_n \pm 10 \%$ , ja

· kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä  $U_n + 10 \%$  /  $- 15 \%$ .” (Mäkinen 2017)

Tässä on koottu selkeämpi taulukko standardin määrittämistä jännitteen raja-arvoista. Arvot ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Verkon jännitteiden raja-arvot

Tehollisarvojen keskiarvot 10 min jaksoilta viikon ajan	Minimi-jännite [V]	Maksimi-jännite [V]
Nimellisjännite 230 V		
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	207	253
Normaalit käyttöolosuhteet 100 % keskiarvoista	195,5	253
Syrjäseudut ja erillisverkot 100 % keskiarvosta	195,5	253
Nimellisjännite 400 V		
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	360	440
Normaalit käyttöolosuhteet 100 % keskiarvoista	340	440
Syrjäseudut ja erillisverkot 100 % keskiarvosta	340	440
Nimellisjännite 20 kV		
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	18000	22000
Normaalit käyttöolosuhteet 100 % keskiarvoista	17000	22000
Syrjäseudut ja erillisverkot 100 % keskiarvosta	17000	22000

### 3.3 Harmoninen yliaaltojännite

Verkossa esiintyy epälineaarisia kuormia kuten tehoelektroniikkaa. Epälineaariset kuormat aiheuttavat yliaaltoja virtoihin ja jännitteisiin. Nämä jännitteen yliaallot ovat sinimuotoisia jännitteitä, jotka ovat jakelujännitteen perusaallon taajuus kerrottuna jollakin kokonaisluvulla. Ne summautuvat jännitteen perusaalton verkossa. Yliaaltojen suhteellista amplitudia perusaalton nähden voidaan kuvata harmonisen kokonaissärön avulla. Sitä kutsutaan lyhenteellä THD (engl. total harmonic distortion). Se tarkoittaa kaikkien yliaaltojen neliöllistä summaa perusaalton nähden. Kaavalla (1) voidaan laskea harmoninen kokonaissärö.

$$THD = \sqrt{\sum_{j=2}^{\infty} \left(\frac{V_j^2}{V_1^2}\right)} \quad (1)$$

Kaavassa  $j$  on perusaallon monikerran luku,  $V_j$  on jännitteen perusaallon monikerran amplitudi ja  $V_1$  on jännitteen perusaallon amplitudi. THD voidaan laskea myös virtoja käyttäen, mutta sen arvoihin standardi SFS-EN 50160:2010 ei ota kantaa. (Lötjönen 2015; Mäkinen 2017)

Standardi SFS-EN 50160:2010 määrittelee harmoniset yliaaltojännitteet seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, jokaisen viikon aikana, 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulee olla pienempi tai

yhtä suuri kuin taulukossa 2.1 annettu arvo. Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (THD, mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.” (Mäkinen 2017)

Yllä olevassa lainauksessa mainittu taulukko 2.1 on tässä työssä taulukko 4. Siinä järjestysluku  $n$  vastaa kaavassa (1) mainittua perusaallon monikertaa  $j$ .

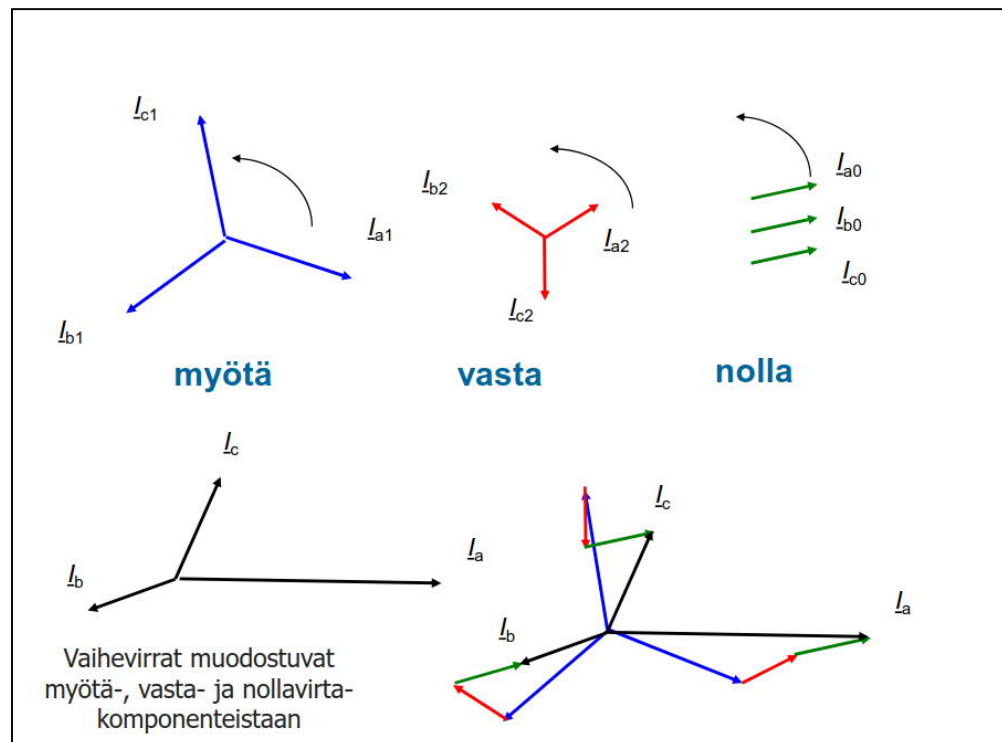
Taulukko 4. Yliaaltojen raja-arvot. (Muokattu lähteestä Mäkinen 2017)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku $n$	Suhteellinen jännite [%]	Järjestysluku $n$	Suhteellinen jännite [%]	Järjestysluku $n$	Suhteellinen jännite [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
Kokonaissärökerroin (THD)				8 %	

### 3.4 Epäsymmetria

Verkossa pyritään pitämään kuormitus jokaisella vaiheella yhtä suurena, mutta aina tämä ei ole mahdollista. Kolmivaiheiset lämmitysvastukset ja moottorit kuormittavat verkossa kaikkia vaiheita tasaisesti, jolloin ne ovat symmetrisiä kuormia. Sen sijaan esimerkiksi rakennuksissa kolme vaihetta jaetaan tasaisesti ympäri rakennusta siten, että niille tuleva kuormitus olisi tasainen kaikilla vaiheilla. Tämä kuitenkin ei ole täysin mahdollista ja aina jokin tai jotkin vaiheet kuormittuvat enemmän kuin toiset. Tämä aiheuttaa epäsymmetristä kuormitusta muuntajiin ja sähköverkkoon. Tämän lisäksi generaattorit voivat aiheuttaa vikavirtoja verkkoon. Epäsymmetrisellä kuormituksella tarkoitetaan tilannetta, jossa eri vaihevirrtojen ovat eri suuria keskenään tai vaihevirtojen ja vaihejännitteiden kulmaerot poikkeavat toisistaan. Epäsymmetrisesti kuormitettua verkkoa ei voida laskea tavallisin menetelmin. Epäsymmetrinen järjestelmä voidaan kuitenkin kuvata symmetrisillä komponenteilla jakamalla se kolmeen symmetriseen järjestelmään. Symmetrinen komponenttijärjestelmä on matemaattinen työkalu, jonka sisältämiä symmetrisiä järjestelmiä kutsutaan myötä-, vasta- ja nollajärjestelmiksi. Myötäjärjestelmän vaihejärjestys on a-b-c, vastajärjestelmän on a-c-b ja nollajärjestelmässä kaikki vaiheet ovat

yhtä suuria sekä vaihekulmat saman suuruiset. Vaihejännitevektori saadaan, kun kyseisen vaiheen myötäjännite-, vastajännite- ja nollajännitekomponentti lasketaan yhteen. Tämä on esitetty kuvassa 17 virtojen tapauksessa. (Ahoranta 2004; Bastman 2012)



**Kuva 17.** Symmetrisen järjestelmän komponentit esitelty (Muokattu lähteestä Nouisainen 2011)

Jännitteen epäsymmetrian vertailemiseen käytetään eurooppalaisten IEC -standardien mukaan suuretta Voltage Unbalance Factor (VUF). Sillä vertaillaan vastajännitteen suhdetta myötäjännitteeseen. On olemassa myös muita tapoja tarkastella ja vertailla epäsymmetriaa. Vastavirran ja myötävirran suhde eroaa VUF:in kautta lasketusta suhteesta ja voi olla huomattavasti isompi. Kaavassa (2) on esitetty VUF:in laskeminen. Siinä  $V_2$  on vastajännite ja  $V_1$  myötäjännite. (Tangsunantham and Pirak 2013; CT LAB 2017)

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \% \quad (2)$$

Standardi SFS-EN 50160:2010 määrittää jakelujännitteen epäsymmetrian seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, jokaisen viikon aikana, 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulee olla välillä 0...2 % myötäkomponentista.” (Mäkinen 2017)

Tähän on koottu standardin vaatimat raja-arvot selkeämmin. Ne on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. *Epäsyyntian raja-arvot.*

Tehollisarvojen keskiarvojen suhde 10 min jaksoilta viikon ajan	VUF maksimi [%]
Nimellisjännite 230 V	
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	2
Nimellisjännite 400 V	
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	2
Nimellisjännite 20 kV	
Normaalit käyttöolosuhteet 95 % keskiarvoista	2

### 3.5 Välkyntä

IEC on määritellyt välkyntänsä seuraavasti: ”Välkyntä on valonlähteen luminanssin (pinta-kirkkauden) tai spektrijakautuman muutosten aiheuttama näköaistimuksen epävakaisuus (IEV 161-08-13).” (Mäkinen 2017). Välkyntä aiheutuu nopeista jännitteen vaihteluista verkossa. Vaihteluista aiheutuu valaisimissa kirkkauden muutoksia, jotka ihminen havaitsee. Välkyntänsä häiritsevyys on tarkkailijasta kiinni, mutta sille on myös olemassa standardoituja raja-arvoja. Jännitevaihtelut taas johtuvat kuormituksen vaihteluista. Verkosta voidaan ottaa hetkellisesti paljon virtaa, kun esimerkiksi verkossa oleva kone tai laite käynnistetään. Vaihteluiden suuruus riippuu siitä, kuinka suuri kuormitus hetkellisesti on ja kuinka jäykästä verkosta on kyse. Lähellä muuntamoita olevat suuretkin kuormitukset voivat olla aiheuttamatta välkyntää, mutta pitemmällä verkossa olevilla alueilla välkyntä voi näkyä pienemmälläkin kuormituksella. Välkyntää voi aiheuttaa esimerkiksi sähkömoottoreiden käynnistys, hitsauskoneet, valokaariuunit ja maalämpöpumput. Välkyntää käsitellään vain tässä teoriaosuudessa ja se on jätetty myöhemmin työssä tarkasteltavista laskelmista ja simuloinneista pois. (Suurinkeroinen 2012; Mäkinen 2017)

Välkyntänsä esiintymistajuuus, pituus ja voimakkuus voi vaihdella. Mitä harvemmin välkyntää tapahtuu ja mitä lyhyempää sekä heikompaa välkyntää on, sitä vähemmän se häiritsee. Samoin mitä useammin välkyntää tapahtuu ja mitä pidempää ja vahvempaa välkyntää on, niin sitä enemmän se häiritsee. UIC (International Union for Electricity Applications) ja IEC ovat standardoineet menetelmän välkyntänsä ärsyttävyyden voimakkuuden mittaamiseen. UIC-IEC menetelmällä määritellään lyhytaikainen välkyntänsä häiritseväisyysindeksi  $P_{st}$  ja pitkäaikainen välkyntänsä häiritseväisyysindeksi  $P_{lt}$ . Yksinkertaistettuna menetelmä toimii siten, että aluksi jännitesignaalia mitataan tietty aika ja tämän jälkeen mittaukselle tehdään tilastollinen analyysi, josta saadaan muodostettua tiheysfunktio. Tästä johdetaan kertymäfunktio, josta saadaan joukko pisteitä, joilla voidaan laskea häiritseväisyysindeksit. Lyhytaikainen välkyntänsä häiritseväisyysindeksi  $P_{st}$  saadaan laskettua kaavalla (3), käyttäen 10 minuutin tarkkailuajanjaksoa.

$$P_{st} = 0,1\sqrt{3,14P_{0,1} + 5,25P_{1s} + 6,57P_{3s} + 28P_{10s} + 8P_{50s}} \quad (3)$$

Kaavassa suureet  $P_{0,1}$ ,  $P_{1s}$ ,  $P_{3s}$ ,  $P_{10s}$  ja  $P_{50s}$  ovat välkynnän voimakkuuksia, jotka ylittyvät tietyn prosentin ajasta.  $P_{1s}$  viittaa välkynnän voimakkuuteen, joka ylittyy 1 % mitatusta ajasta.  $P_{50s}$  tarkoittaa taas välkynnän voimakkuutta, joka ylittyy 50 % ajasta. Nämä arvot saadaan aiemmin muodostetusta kertymäfunktioista. Alaindeksi  $s$  tarkoittaa, että suureissa käytetään tasoitettua arvoa, mitä käytetään suurimmassa osassa kaavan suureista. Vain  $P_{0,1}$  on tarkka arvo.

Välkyntä voi kuitenkin tapahtua suuremmilla aikaväleillä ja epäsäännöllisesti, jolloin on laskettava pitkäaikainen välkynnän häiritseväisyysindeksi  $P_{lt}$ . Se saadaan jatkettua lyhytaikaisesta indeksistä kaavalla (4).

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st}^3} \quad (4)$$

Kaavassa tarkastellaan kahden tunnin ajanjaksoa, eli 12 kappaletta perättäisiä 10 minuutin  $P_{st}$  häiritseväisyysindeksin arvoja. (Medeiros et al. 2004; Mäkinen 2017)

SFS-EN 50160:2010 määrittää välkynnän raja-arvot seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon aikana, jännitteen vaihtelun aiheuttaman välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla  $P_{lt} \leq 1,95$  % ajasta.” (Mäkinen 2017)

## 4. VERKOSTOLASKELMAT

Tässä osiossa selostetaan tehtyjä simuloitteja. Niissä tarkasteltiin kuinka sähköautojen lisääntyminen vaikuttaa sähköverkkoon aiemmissa osioissa läpikäytyjen tavoitteiden ja ennusteiden osalta. Jokainen muutos käydään lävitse yksitellen ja tarkastellaan mikä on lähtötilanne sekä kuinka paljon tilanne muuttuu, kun verkkoon lisätään sähköautojen latauksesta aiheutuvaa kuormaa tavoitteiden mukaan.

Samalla käydään lävitse lähtötiedot simuloinneille ja mitä niihin liittyviä muuttujia on kiinnitetty ja miksi. Samoin mitkä oletukset on tehty ennen simuloitteja ja millä perusteilla.

### 4.1 Ohjelmiston esittely

Työssä simulointi on toteutettu MathWorksin Matlab-ohjelmalla, joka on numeeriseen laskentaan tarkoitettu tietokoneohjelma. Sitä käytetään kaikkien logiikkaan ja lähtöarvoihin työn pohjalla. Matlabissa on simuloitteihin käytetty DSSHarmoonix sähkön-laadun laskentatyökalua, joka on toteutettu OpenDSS simulointiohjelman pohjalta. DSSHarmoonix työkalun soveltaminen tähän työhön on Tampereen yliopiston tutkimusapulaisen Antti Supposen käsialaa. OpenDSS on taas Electric Power Research Institute:n (EPRI) avoimeen lähdekoodiin pohjautuva sähköjakeluverkon simulointiohjelma, jolla voidaan analysoida erilaisia sähköverkkoja. Se toteuttaa tarkasteltavan verkon tehonjaon laskennan. (Electric Power Research Institute 2017) DSSHarmoonix:illa voidaan laskea sähköverkosta aikasarjapohjaisia tehonjakolaskelmia taajuustasossa. Laskentatyökalulla voidaan tarkastella kaikkia edellisessä osiossa läpikäytyjä verkon suureita, paitsi välkyntää. Simuloitteja varten on jo aiemmin mitattu eri sähköautojen latausta erilaisilla tehoilla ja lataustapahtumiin liittyviä käyrämuotoja. Näistä on muodostettu harmoniset spektrit, joita käytetään verkostolaskennassa. Simuloinneissa käytetään realistista sähköverkkoa, johon kuuluu keskijännite ja pienjännitealueita. Yhtenä työn tehtävänä on myös tarkastella työkalun toimivuutta ja ongelmia.

### 4.2 Lähtötiedot autoista

Laskennassa ja mittauksissa on käytetty seuraavia autoja: Opel Ampera, Nissan e-NV200 ja Tesla Model S. Nämä ovat kaikki erilaisia autoja ja niistä saadaan hyvä otanta eri tyyppisistä sähköajoneuvoista tähän työhön. Autoja on ladattu erilaisilla tehoilla, joiden mittausarvot ovat simulointilaskentojen pohjana.

Opel Ampera edustaa tavallista henkilöautoa, joka tekniseltä toteutukseltaan on PHEV-pohjainen. Autoa voidaan ladata suoraan sähköverkosta ja se voi kulkea ladatulla energialla 40–80 km matkoja. Mukana on kuitenkin E-REV teknologia, jolla saadaan pidentettyä auton maksimikäyttömatkaa jopa 500 km, jos tarvetta ilmenee. Tämä taas kuluttaa perinteistä polttoainetta sähköön tuottamiseen. Opelin latauksen mittauksia käytettiin simuloinneissa kuvaamaan hidasta yksivaiheista 10 A kotilatausta. (Opel 2018)

Nissan e-NV200 on BEV teknologialla varustettu pakettiauto, joka on tarkoitettu yritysten käyttötarpeisiin. Auto pystyy suoriutumaan jopa 170 km matkoista täysin sähköisesti. Auto on rakennettu yhdistämällä Nissan LEAF -sähköhenkilöauton testattu tekniikka NV200 -polttomootoripakettiauton kanssa. Nissanin latauksen mittauksia käytettiin simuloinneissa kuvaamaan nopeaa yksivaiheista 20 A:n kotilatausta. (Nissan 2018)

Tesla Model S on myös BEV tyyppinen auto. Tämä on kuitenkin toteutukseltaan paremman luokan henkilöauto ja hyvin suorituskykyinen. Voidaan puhua urheiluautosta. Model S voi kulkea jopa 679 km yhdellä latauksella ja kiihtyvyys nolasta sataan tapahtuu ajassa 2,7 s. Tesla on keskittynyt pelkästään sähköautojen valmistamiseen toisin kuin muut automerkit tässä työssä. Teslan latauksen mittauksia käytettiin simuloinneissa kuvaamaan nopeaa kolmivaiheista 32 A:n kotilatausta. (Tesla 2018)

Tämän työn taustatyönä on tehty latauksia erilaisilla virroilla ja tehoilla yllä mainittuihin autoihin ja näistä mittaustuloksista on luotu lähtötietoja simulointityökalulle. Opel Ampera -henkilöautoa ladattiin vain yksivaiheisesti 10 A:n virralla. Nissan e-NV200 -pakettiautoa ladattiin yksivaiheisesti virroilla 20 A, 16 A, 10 A ja 6 A. Tesla Models S -henkilöautoa ladattiin kolmivaiheisena 32 A, 20 A ja 16 A latausvirroilla. Näiden lisäksi ladattiin kolmivaiheisena sekä yksivaiheisena 10 A ja 6 A latausvirroilla. Mittaustuloksia on myös olemassa Teslan Supercharger laturilta 200 A:iin asti, mutta niitä ei simulointityökalussa ole käytetty.

### 4.3 Tutkimuksen eteneminen

Työ eteni niin, että simuloinnin pohjaksi saatiin verkon omistavalta sähköverkkoyhtiöltä kuormitustiedot. Tämän avulla voitiin simuloida verkon perustilanne ja tarkastella kuinka verkko käyttäytyy ilman ylimääräistä sähköautokuormaa. Simuloinnissa käytetyt kuormitustiedot olivat vuodelta 2015. Autojen määrät alueella olivat taas vuodelta 2017, joten tästä aiheutuu pieni epätarkkuus. Kuormitustiedoissa on siis mukana jo kaikki vuonna 2015 verkon alueella olevat sähköajoneuvot. Tässä kohdassa on huomioitava, että aivan kaikille verkon asiakkaille ei ollut saatavilla mittaustuloksia kuormituksesta, jolloin niiden

kulutus on oletettu nolaksi. Näin saatiin verkon alkuperäinen vertailutilanne kuormituksen, jännitetasen, harmonisten yliaaltojännitteiden ja epäsymmetrian osalta.

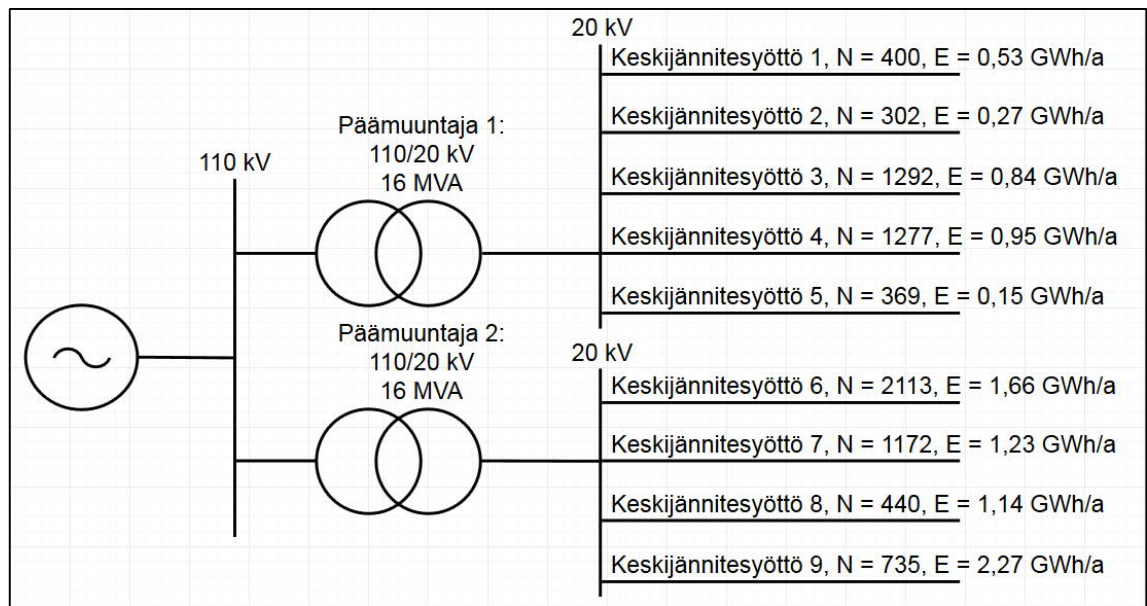
Oletuksena simuloinnissa oli, että autojen määrä pysyy samana, eli autokannassa ei synny kasvua. Autokannasta osa vain muuttuu sähköautoiksi. Samoin oletuksena on, että sähköverkko pysyy samanlaisena koko tarkasteluajan, vaikka sähköautojen tehokkaita latauslaitteita tulisikin simulointiin lisää. Lähtökohtana sähköautoille käytettiin Pirkanmaan alueella olevien sähköautojen määrää, joka oli 122 kappaletta vuonna 2017. Tämän jälkeen tutkittiin kuinka kaikki autot jakautuvat tarkasteltavan verkon alueella. Pelkkä sähköautojen määrän tutkiminen tilastoista olisi antanut väärän kuvan, koska esimerkiksi noin puolet sähköautoista Pirkanmaalla on tällä hetkellä Tesla Model S -mallia. Tämä on kuitenkin selvästi kalliimpi ja paremman luokan auto, joka kuuluu eurooppalaisen kokoluokituksen mukaan E-segmenttiin. Totuudenmukaisempi kuva saadaan, kun tarkastellaan kaikkien uusien polttomoottorillisten E-segmentin autojen ostoprosenttia Suomessa ja pidetään tätä Teslojen osuutena. Se on vuonna 2017 ollut 17,94 %. Tässä myös tehtiin pieniä oikaisuja, koska verkon alueen kokonaisuutensa kuuluu myös kuorma-autoja ja linja-autoja, mitä taas simuloinnissa käytettävissä sähköautoissa ei ollut tarjolla. Nämä kyseiset autot tarkasteltiin Nissan sähköpakettiautoina. Vuonna 2017 tällaisia autoja olisi 18,05 % autoista verkon alueella. Tällä tavalla rakennetulla ennusteella, sähköautojen kokonaisautomäärät pyöristyisivät karkeasti simuloinneissa käytettyihin autoihin seuraavasti: 64 % Opel Ampera, 18 % Nissan e-NV200, 18 % Tesla Model S. Työssä simuloinnissa käytetyt sähköautot eivät siis kuvastaneet tiettyjä autoja verkossa, vaan eri lataustapoja verkossa.

Taulukossa 6 on listattu sähköautojen arvioidut määrät eritehoisissa latauspisteissä. Määrät eivät summaudu aina tasan, koska taulukossa on otettu huomioon vain kokonaiset autot. Tällöin esimerkiksi 2017 vuoden tilanteen kaksi autoa ei jakaudu kohdeverkkoon järkevästi suhteessa, jolloin se pyöristyy tasan yhdeksi autoksi yhdessä paikassa. Joissain tilanteissa pyöristys voi olla toiseen suuntaa, mutta missään tilanteessa jaettujen autojen määrä ei eroa enempää kuin yhden auton verran kokonaisuutensa. (Trafi 2017a; ACEA 2018)

Taulukko 6. Sähköautojen määrä eritehoisissa latauspisteissä.

		Arvio	Arvio	Tavoite	Tavoite	Tavoite
		Suomi 2017	Suomi 2017	Suomi 2030	EU 2030	EU 2050
Lataus- virta	Prosentti- osuus	Pirkanmaa	Kohde verkko	Kohde verkko	Kohde verkko	Kohde verkko
[A]	[%]	autoja	autoja	autoja	autoja	autoja
1 x 10	64	78	1	322	2020	4042
1 x 20	18	22	0	91	568	1137
3 x 32	18	22	0	91	568	1137
Kokonais- määrä:	100	<b>122</b>	2	503	3157	6316

Tämän jälkeen verkkoon lisätiin kuormaa sähköautojen muodossa, niin että erilaiset tavoitteet täyttyivät sähköautojen määrissä. Autojen määrät sijoitettiin satunnaisesti tarkasteltavan verkon eri kohtiin siten, että sijoituspaikka on todennäköinen kyseiselle latausteholle. Liitteestä A selviää, kuinka eri lataustyyppit rajattiin verkon eri asiakkaille. Esimerkiksi 3 x 32 A latausvirralle oli verkossa kaksi asiakastyyppeä, joilla kyseinen latausteho saattoi olla. Näitä asiakkaita on verkossa useita ja niiden kesken sijoitettiin tämän tehon automäärä satunnaisesti. Kaikille kyseisen tyyppin asiakkaille ei välttämättä riittänyt autoa ollenkaan. Lataustehot sijoitettiin myös eri vaiheille satunnaisesti. Lopuksi autojen latauskuormat koottiin 20/0,4 kV -muuntajien toisiopuolelle kuormaksi simulointia varten. Muuntajilla saattoi siis olla kuormana useita erilaisia sähköauton lataustehoja ja useissa eri vaiheissa tai ei mitään tai jotain näiden väliltä. Kuvassa 18 on tarkasteltavan verkon periaatteellinen rakenne vuonna 2015. Siinä  $N$  on asiakkaiden määrä ja  $E$  vuodessa kulunut energia.



**Kuva 18.** Tarkasteltavan verkon periaatteellinen rakenne ja kuormitustiedot vuodelta 2015.

Lähtötiedot sähköautojen latausajoista ja energioista saatiin tekniikan tohtorin Antti Rautiaisen tutkimuksesta. (Rautiainen et al. 2012) Tästä saatiin todennäköisyydet latausajoille ja energioille jaoteltuina erikseen arki-, lauantai- ja sunnuntaipäiville. Samoin latausenergiat saatiin erikseen kesä- ja talviajalle. Kesän latausaikoja ja -tehoja simuloinneissa käytettiin huhtikuun ja lokakuun välillä. Talven latausaikoja ja -tehoja käytettiin marraskuun ja maaliskuun välillä. Latausajat ja energiat löytyvät liitteestä B. Työssä lataukset rajoitettiin simuloinneissa vain yhteen kertaan per päivä per auto. Tämän latauksen kokonaisenergia ja aloittamisajankohta satunnaistettiin käyttäen edellä mainittuja tietoja. Latauksen satunnaistamisen prosessi on selvitetty liitteessä C. Tässä kohdassa on otettava huomioon, että Rautiaisen tutkimuksesta saadut pohjatiedot antavat vain ihmisten käyttäytymismallit autojen käytölle eri viikon päivinä ja vuoden aikoina. Se ei kerro kuinka paljon sähköauto kuluttaa enemmän talvella tai kuinka paljon sitä ladataan enemmän. Se antaa vain ihmisten käyttäytymismallin mistä voi selvittää eroavaisuuksia kesä- ja talvikäytön välillä sekä arki- ja viikonloppukäytön välillä. Todellisuudessa sähköautoja tul-taisiin lataamaan enemmän talviaikaan kuin kesäaikaan. Harmoniset yliaallot eri lataus-tehoille ovat peräisin Antti Supponen tutkimuksesta (Supponen et al. 2016). Yksivaihei-set lataukset myös satunnaistettiin eri vaiheille.

Simulointi kohdeverkolle ajettiin aina uudestaan eri tilanteessa ja tarkasteltiin kuinka lisääntynyt sähköautokuorma vaikuttaa verkkoon. Eri tilanteet eivät kuitenkaan ole autojen sijoituksilta, latausenergioilta ja latausajankohdilta täysin vertailukelpoisia. Tämä joh-

tuu siitä, että aina kun simuloitiin uusi tilanne, niin kaikki muuttajat satunnaistettiin uudestaan. Tästä syystä autot saattoivat vaihtaa paikkoja kohdeverkossa, vaikka niiden todennäköisesti pitäisi olla verkossa jonkun tietyn muuntajan kuormana molemmissa tilanteissa. Tämä voi aiheuttaa esimerkiksi tilanteen jossa pieni määrä sähköautoja verkossa ylikuormittaa tietyn muuntajan. Sitten kun autoja lisätään verkkoon ja simuloidaan uudestaan, niin kyseinen muuntaja ei ole enää ylikuormittunut.

Ensimmäisessä vuoden 2017 alkuperäisessä tilanteessa esitellään hieman kattavammin teoreettisia ja käytännön raja-arvoja sähköverkolle. Samoin erilaisten simulointien lähtötiedot on käyty lävitse tarkemmin. Myöhemmissä tilanteissa on näiden toistaminen jätetty pois ja keskitytty enemmän suoraviivaiseen tulosten esittämiseen. Tarkempaa tarkastelua on myös lisätty aina kun jokin tilanne on sitä vaatinut. Simulointituloksissa on otettava huomioon, että mittaukset sijoittuvat verkossa suoraan 20/0,4 kV muuntajan ensiö- tai toisiopuolelle riippuen simuloinnista. Tästä johtuen standardin SFS-EN 50160:2010 arvoja ei voida pitää suoraan raja-arvoina. Muuntajan toisiopuolelta verkko jatkuu vielä asiakkaalle, missä standardin raja-arvojen on täyttyvä.

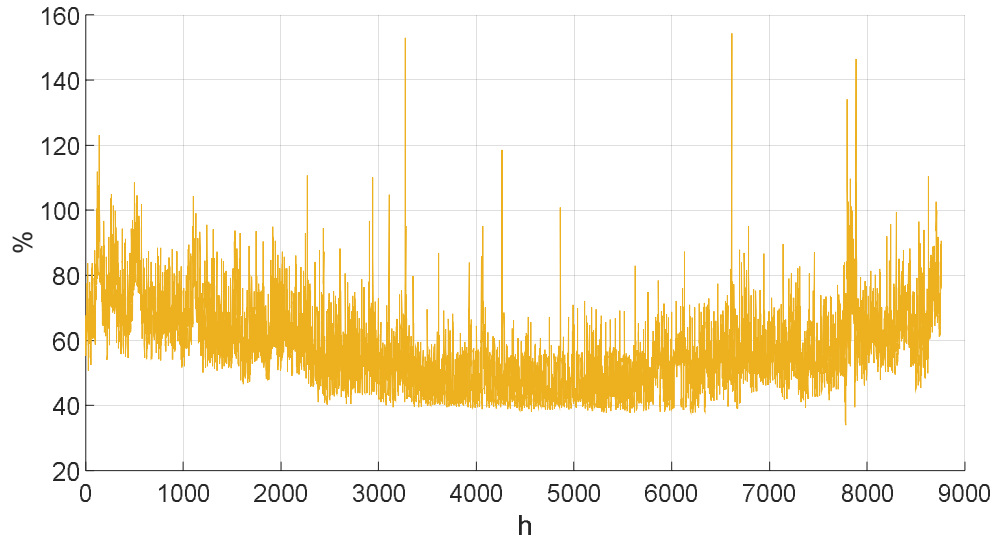
## 4.4 Alkuperäinen tilanne vuonna 2017

Tässä simuloitiin vuoden 2017 tilannetta. Taulukon 6 ilmoittamaa sähköautojen määrää ei erikseen ole lisätty verkon lähtötietoihin, koska autojen määrä on häviävän pieni. Tilanne ei tulisi muuttumaan, vaikka verkkoon lisättäisiin taulukon 6 ilmoittama yksi sähköauto. On varsin todennäköistä, että se sisältyy jo olemassa oleviin kuormitustietoihin ennakkoon. Käytännössä simuloitiin vain tarkasteltavaa verkkoa perustilanteessa ilman lisättyä sähköautokuormaa. Verkon tilannetta on tarkasteltu erikseen eri suureiden osalta.

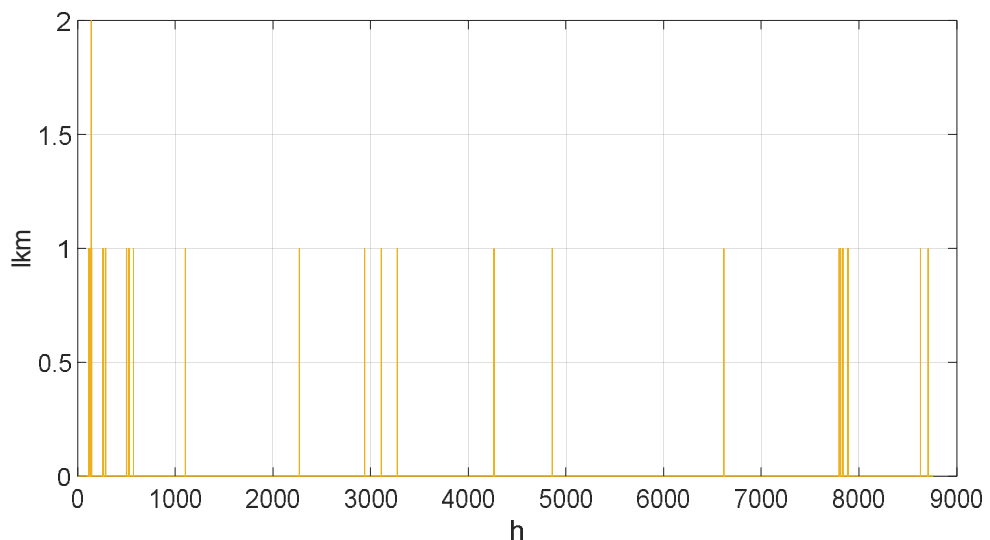
Kaikissa tulevilla kuvaajissa näkyy piikki vajaan 8000 tunnin kohdalla. Jännitekuvaajissa se näyttää suuremmalta kuin muissa kuvaajissa. Tämä on toistuva virhe, mikä johtuu tarkasteltavassa verkossa olleesta sähkönjakelun keskeytyksestä lokakuussa 2015. Se on siis olemassa jo kuormitustiedoissa, joita simuloinneissa käytetään pohjana. Häiriötilan aikana verkon osia on nolakuormassa, josta syystä verkon mitatut jännitteet ovat korkeampia kuin normaalitilanteessa pitäisi olla.

### 4.4.1 Kuormitus

Tässä simuloitiin verkon muuntajien kuormitustilannetta ilman lisättyjä sähköautoja. Kuvassa 19 on esitetty jokaisen vuoden tunnin aikana toteutuva muuntajien maksimi-kuormitusprosentti. Kuvassa 20 näkyy kuinka moni muuntaja ylittää 100 % nimelliskuormitusprosentin kyseisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.



**Kuva 19.** Verkon suurin muuntajien kuormitusprosentti jokaiselle vuoden tunnille alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa.

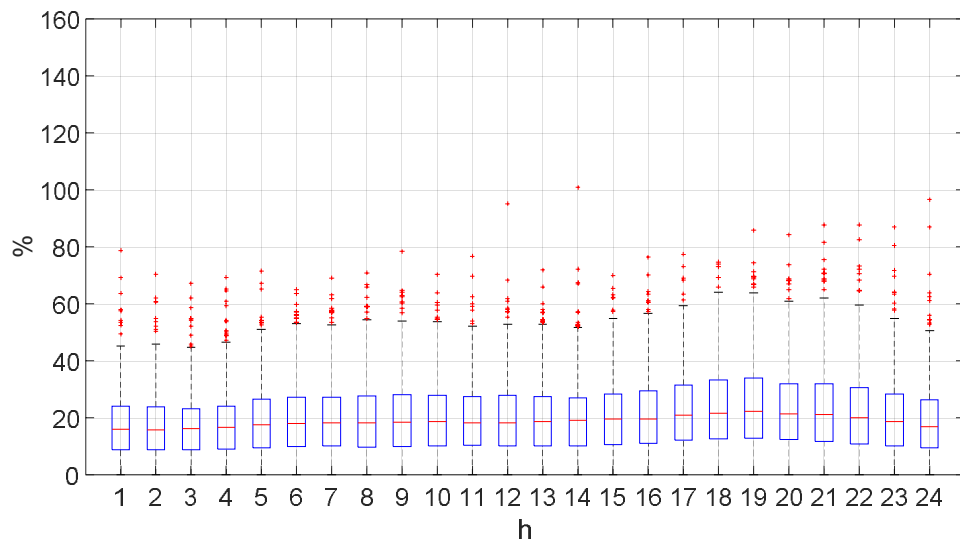


**Kuva 20.** 100 % nimelliskuormituksen ylityksen tekevien muuntajien lukumäärä tietyn tunnin kohdalla alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa.

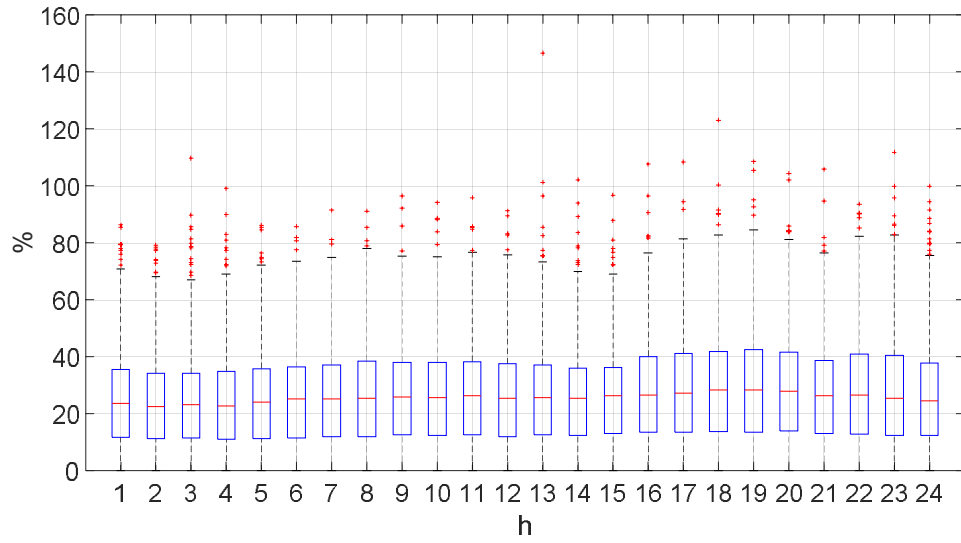
Suurin maksimikuormitusprosentti on noin 154 % ja pienin maksimikuormitusprosentti on noin 34 %. Tyypillisesti ilmajäähdytteinen muuntaja voi käydä 100 % nimelliskuormalla 30 °C lämpötilassa ilman, että sen käyttöikä lyhenee. Jos lämpötila laskee tästä 10 °C, voi muuntajan huippukuormitus nousta 110 %:iin ilman, että muuntaja tai sen käyttöikä kärsii. Tätä suhdetta voidaan karkeasti käyttää –30–30 °C lämpötilojen välillä. Tämä tarkoittaa, että –30 °C lämpötilassa talvella ilmajäähdytteistä muuntajaa voitaisiin kuormittaa noin 160 % ilman ongelmia. Tarkasteltavassa verkossa muuntajien 100 % nimelliskuormitus ylittyi vuoden aikana 35 tunnin kohdalla. Vain yhdessä näistä tapauksista kaksi muuntajaa on samaan aikaan ylittänyt 100 % nimelliskuormituksen. Kesällä

tapahtuvat ylitykset ovat ongelmallisimpia, koska silloin muuntaja ei kestä niin paljoa ylikuormitusta. Kuitenkin lyhyet yksittäisten muuntajien ylikuormitukset eivät aiheuta suurta ongelmaa. Mielenkiintoisimpia tilanteita ovat alkuvuoden kahden muuntajan ylikuormitus. Samoin kevään ja syksyn korkeat yksittäiset kuormituspiikit, pois lukien 8000 tunnin kohdalla oleva sähkönjakelun keskeytys. (IEEE 2012)

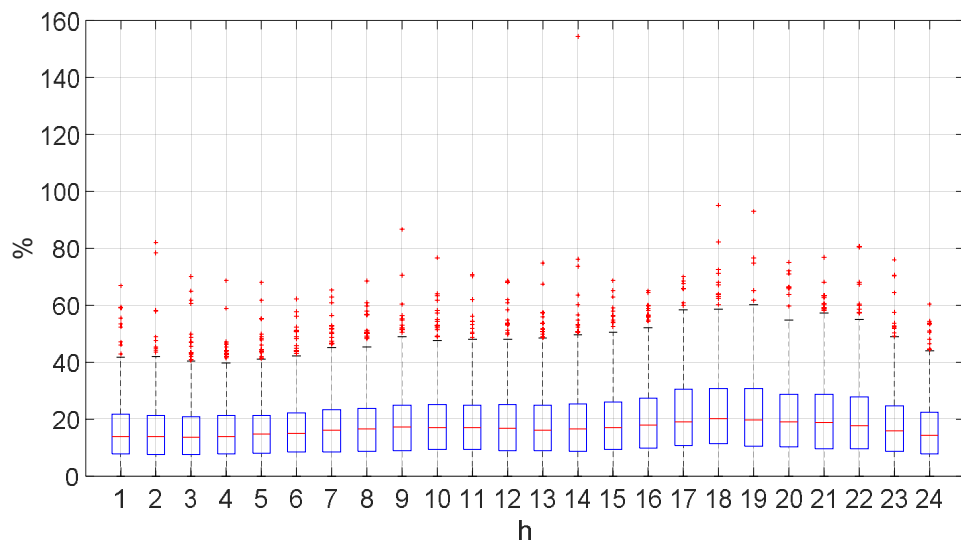
Kuvissa 21–26 on tarkasteltu jokaisen vuorokauden tunnin kohdalta muuntajien kuormitusta verkossa. Kuvat ovat boxplot -kuvaajia missä punainen viiva sinisen laatikon keskellä on kuormitusten mediaani kyseisen tunnin kohdalla. Sininen laatikko sisältää puolet kyseisen tunnin aikana tapahtuneista kuormitusarvoista verkossa mediaanin molemmin puolin. Mustat janat sinisen laatikon ylä- ja alapuolella kuvaavat noin neljäsosia kuormitusarvoista, jotka jäävät yleisemmän arvojoukon puolikkaan ulkopuolelle. Punaiset pisteet kuvaavat kuormitusarvoja joita boxplot -työkalu pitää poikkeavina ja joita se ei laske mukaan aiempaan jaotteluun. Tämän lisäksi työkalu siivoaa kuvaajista pois ääriarvot joita se pitää väärinä. Simulointityökalun puutteista johtuen tässä on jouduttu tekemään oletus, missä jokaisesta muuntajasta käsitellään vain ensimmäisen vaiheen kuormitus. Näistä syistä johtuen joissain tilanteissa huippuarvot voivat erota aiemmin mainituista maksimikuormitusprosentteista. Kuvat ovat tehty erikseen arkipäiville, lauantapäiville ja sunnuntapäiville. Samoin erikseen kesäajalle ja talviajalle.



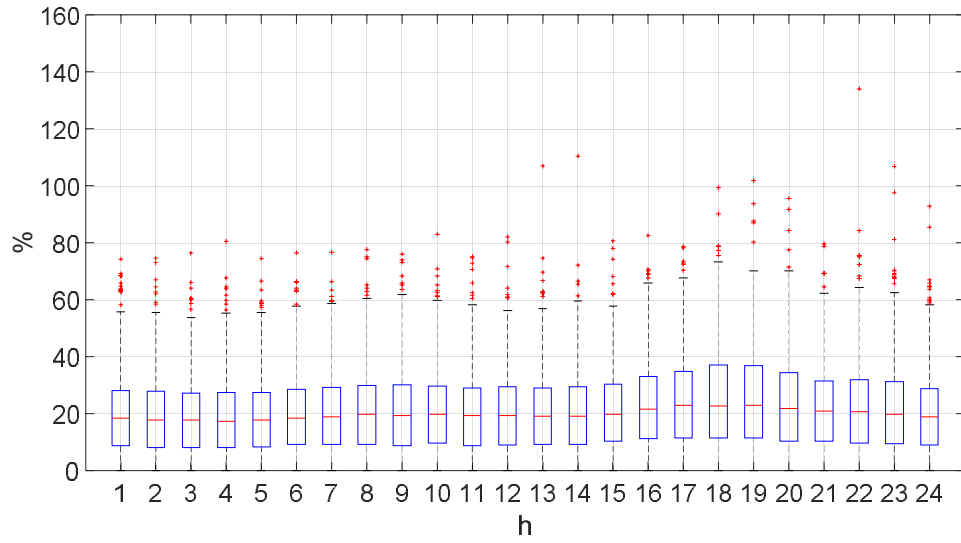
**Kuva 21.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina arkipäivisin vuoden 2017 tilanteessa.



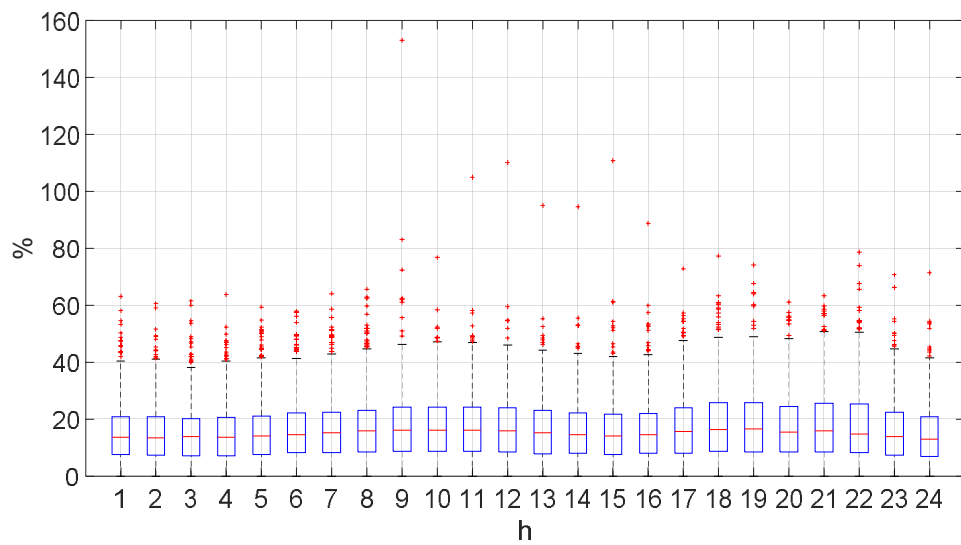
**Kuva 22.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina arkipäivisin vuoden 2017 tilanteessa.



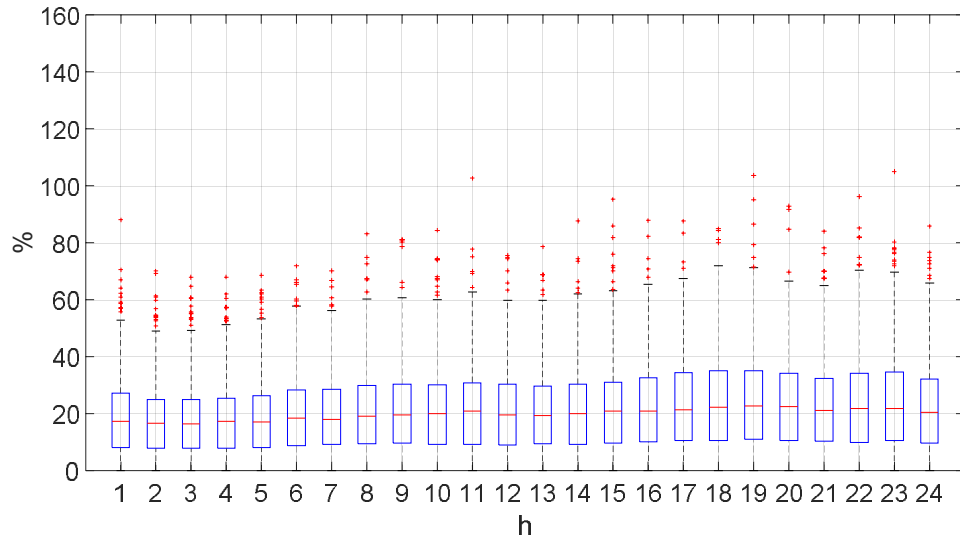
**Kuva 23.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina lauantapäivinä vuoden 2017 tilanteessa.



**Kuva 24.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina lauantapäivinä vuoden 2017 tilanteessa.



**Kuva 25.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina sunnuntapäivinä vuoden 2017 tilanteessa.

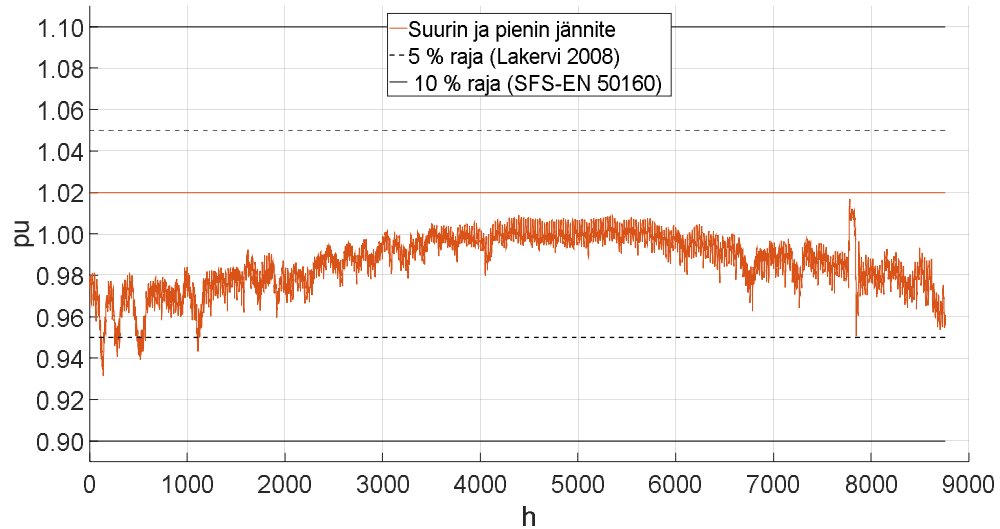


**Kuva 26.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina sunnuntaipäivinä vuoden 2017 tilanteessa.

Yllä olevista kuvista nähdään, että suurin määrä muuntajista on kesäisin noin 0–60 % kuormituksessa. Tätä suuremmassa kuormituksessa on vain yksittäisiä muuntajia. Talvisin kuormitukset ovat noin 0–80 % välillä ja tässäkin tapauksessa yksittäisiä suurempia kuormituksia on joillain muuntajilla. Tyypillisesti kuormitukset ovat suurimmillaan arkisin, iltaisin ja talvisin. Erityispiirteenä voidaan huomata kuvasta 23, että suurin tämän tilanteen kuormitusprosentti löytyy kesälauantailta iltapäivältä klo 14.

#### 4.4.2 Jännitetaso

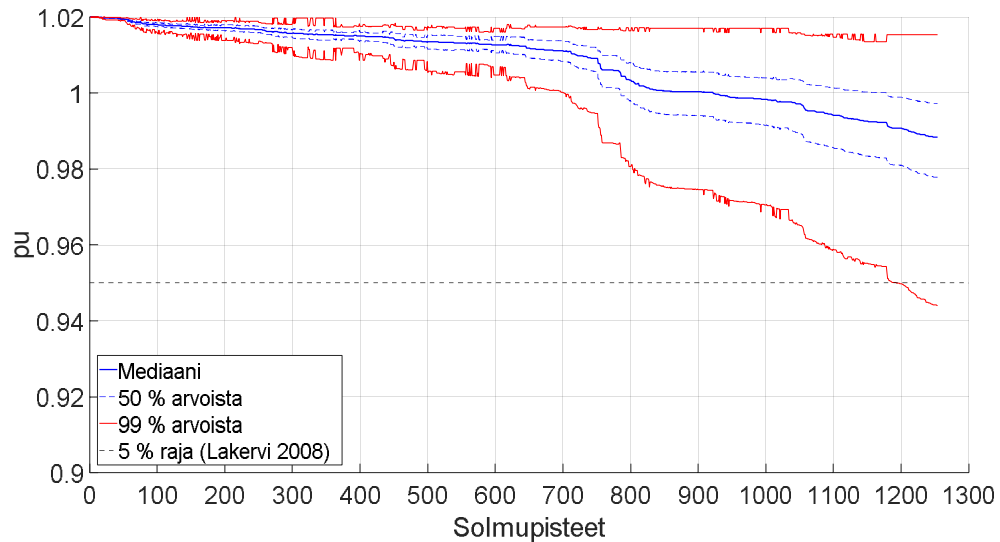
Tässä simuloitiin verkon keskijännitepuolen jännitetasoa ilman lisättyjä sähköautoja. Tarkastelussa on siis muuntajien ensiöpuolen, eli 20 kV puolen eniten poikkeava vaihejännite solmupisteissä verrattuna maareferenssipisteeseen jokaisena vuoden tuntina. Jokaisesta solmupisteestä otetaan vain se vaihe vertailuun, jolla on suurin tai pienin jännitetaso riippuen kumpaa simuloidaan. Kuvassa 27 on esitetty suurin ja pienin jännitetaso verkossa suhteellisilla luvuilla ilmaistuna. Solmupisteet ovat kolmivaiheisia. Kuvassa näkyy myös standardin SFS-EN 50160:2010 määrittelemät 10 % raja-arvot asiakkaan liityntäpisteelle. Samoin kuvaan on lisätty 5 % raja, jota pidetään suunnittelussa sopivana jännitteenalenemana keskijänniteverkoille, joissa on mukana paljon maaseutuverkkoa. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa. (Lakervi 2008)



**Kuva 27.** Verkossa esiintyvä suurin ja pienin jännitetaso jokaiselle vuoden tunnille alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa.

Suurin suhteellinen jännite on noin 1,02 ja se pysyy vakiona koko vuoden ajan. Pienin suhteellinen jännite on noin 0,93 ja se vaihtelee vuoden aikana sekä erottuu kuvasta selkeästi. Jännitetaso ei ylitä eikä alita standardin SFS-EN 50160:2010 määrittelemiä raja-arvoja jännitteelle minkään tunnin aikana keskijänniteverkon puolella. Verkko siis toimii tältä osin hyvin ilman lisättyjä sähköautoja. On kuitenkin huomioitava, että standardi koskee asiakkaan verkkoon liityntäpistettä, johon muuntajalta on vielä matkaa. Jännite voi siis muuttua liityntäpisteeseen mennessä. 5 % rajalla jännite on talviaikaan. Välillä se jopa alittaa sen hetkellisesti alkuvuodesta. Muuntajalla voidaan kuitenkin nostaa jännitettä, ennen kuin siirrytään pienjänniteverkon puolelle. Todennäköisesti asiakkaiden liityntäpisteessä ei vielä synny jänniteongelmia lähtötilanteessa. Tyypillisesti suurimmat jännitteet sijaitsevat keskijänniteverkon alkupäässä lähellä 100/20 kV:n muuntajaa ja pienimmät 20/0,4 kV muuntajan lähellä. Tästä ei kuitenkaan ole tutkittua tietoa tässä työssä. Suuret jännitteet voisivat aiheuttaa ongelmia verkossa, jos siellä olisi seassa hajautettua energiatuotantoa. Tarkasteltavassa verkossa ei kuitenkaan ole tuotantolaitoksia, mutta tulevaisuudessa voi mahdollisesti olla. (Lakervi 2008)

Pienimmän jännitteen vaihtelua tutkittiin laajemmin kaikkien jakeluverkon solmupisteiden osalta. Tässä tarkasteltiin, kuinka paljon pienin jännite vaihtelee jokaisen jakeluverkon solmupisteen kohdalla. Kuvassa 28 on solmupisteet järjestetty pienimmän jännitteen mediaanin mukaan laskevaan järjestykseen. Kuvassa on jätetty 1 % sisään kuuluvat ääriarvot pois kokonaan, jolloin huippuarvot eivät ole täysin samoja kuin aiemmin solmupisteiden jännitteiden vertailussa.



**Kuva 28.** Pienimmän jännitteen vaihtelu verkon jokaisessa solmupisteessä alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa.

Huomioitavaa on, että kuvassa tiettyjen loppupuolen solmupisteiden ääriarvot heittelevät melko paljon. Puolet arvoista kuitenkin mahtuu melko pienelle alueelle huonoimmissakin tilanteissa. Tyypillisesti verkossa loppupään solmupisteiden jännitevaihtelu on suurempaa kuin alkupään. Tästä kuvasta ei kuitenkaan voida sanoa varmuudella missä kuvan solmupisteet verkossa sijaitsevat. Jokaisessa solmupisteessä pysytään melkein 5 % jännitteenalenemassa, kun ääriarvot on karsittu pois.

### 4.4.3 Harmoniset yliaaltojännitteet

Tässä kohdassa simuloitiin verkon muuntajien toisiopuolen yliaaltojännitteiden tilannetta. Tulos ei kuitenkaan ole realistinen, koska verkon datassa ei ole mukana yliaaltoihin vaikuttavia kuormia. Harmoninen kokonaissärö ei siis poikkea alkutilanteessa nolasta kertaakaan vuoden aikana eikä arvo tällöin voi ylittää standardin SFS-EN 50160:2010 määrittämää rajaa. Nollataso on kuitenkin saavutettu, joihin tulevia simulointeja voidaan verrata. Tämä ei kerro todellista tilannetta verkossa ennen sähköautojen lisäämistä, vaan antaa ainoastaan vertailupisteen ja lähtötason. Harmoniset taajuudet eivät vaikuta toistensa ratkaisuun tämän työn simuloinneissa.

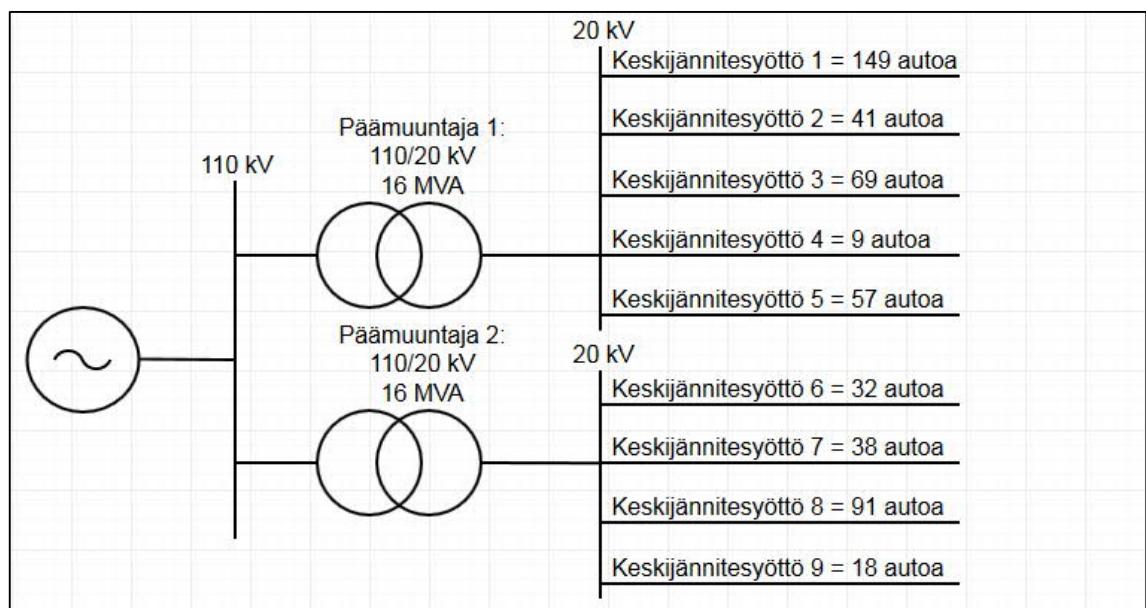
### 4.4.4 Epäsymmetria

Tässä simuloitiin verkon suurinta epäsymmetrian tilannetta vuoden jokaisen tunnin aikana keskijännitepuolen solmupisteissä. Tulos ei ole tässäkään realistinen, koska verkon datassa ei ole mukana epäsymmetriaan vaikuttavia tekijöitä. Epäsymmetrian arvot

ovat todella pieniä ja käytännössä nolla. Ne johtuvat vain työkalun tekemistä pyöristyksistä ja eivätkä ne ylitä standardin SFS-EN 50160:2010 määrittämiä rajoja. Tuloksena on saatu vain nollataso epäsymmetrialle, joihin tulevia simulointeja voidaan verrata.

## 4.5 Suomen tavoite 2030

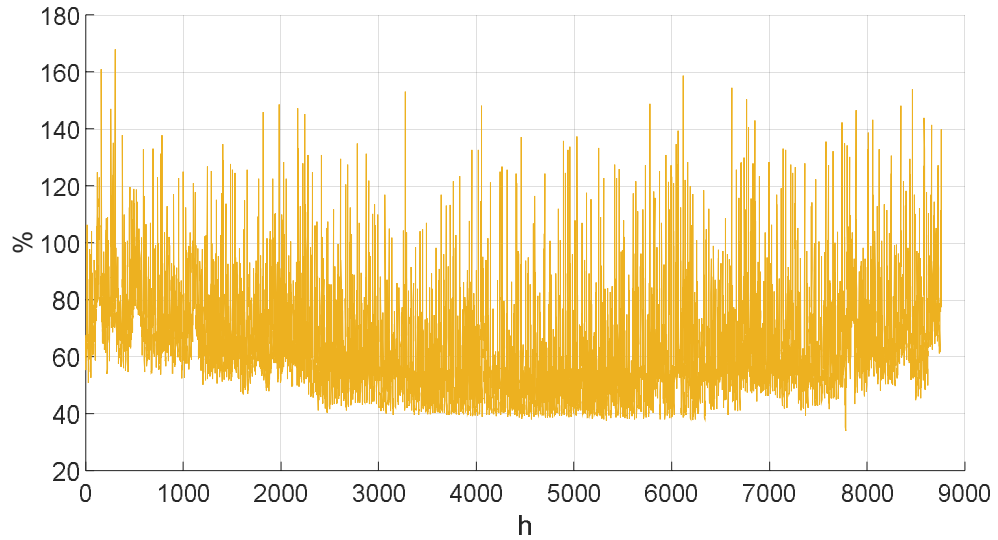
Tässä simuloitiin verkon tilannetta Suomen vuoden 2030 tavoitemäärillä. Taulukko 6 kertoo, että tavoitteen mukaan tarkasteltavan verkon alueella olisi 503 sähköautoa. Näissä simuloinneissa verkon kuormitus kasvoi kyseisellä määrällä sähköautoja. Tämä on jo kohtuullinen muutos autojen määrässä. Eri suuret tarkasteltiin taas erikseen. Kuvassa 29 on näkyvissä autojen määrä eri lähdöillä verkossa.



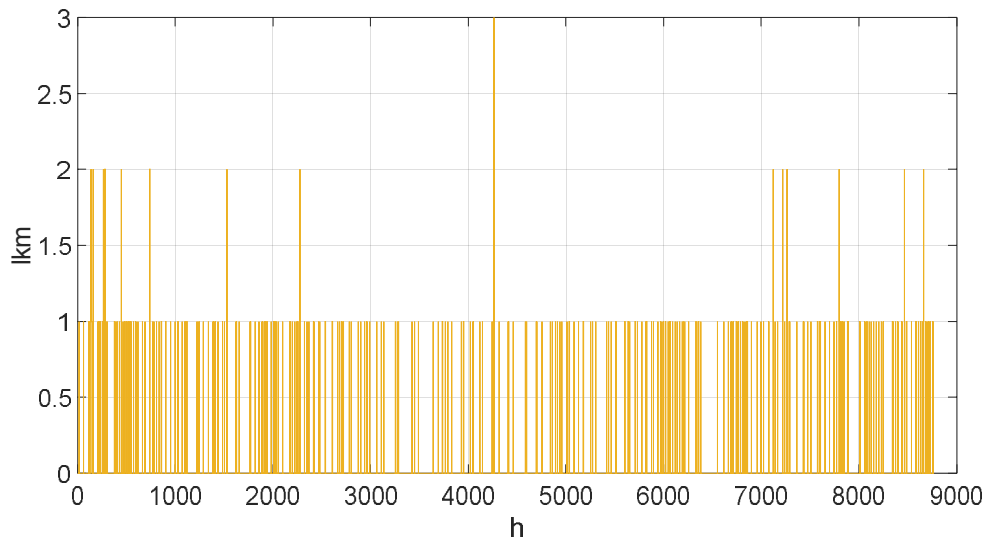
**Kuva 29.** Autojen määrät ja sijoittelut verkossa Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

### 4.5.1 Kuormitus

Kuvassa 30 on esitetty jokaisen vuoden tunnin aikana tapahtuva muuntajien maksimikuormitusprosentti. Kuvassa 31 näkyy kuinka moni muuntaja ylittää 100 % nimelliskuormitusprosentin kyseisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.



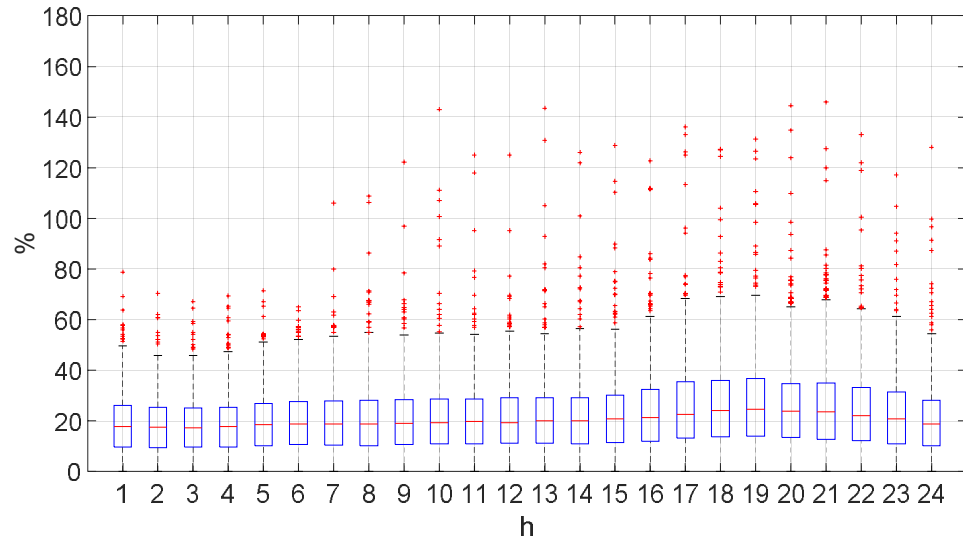
**Kuva 30.** Verkon suurin muuntajien kuormitusprosentti jokaiselle vuoden tunnille Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



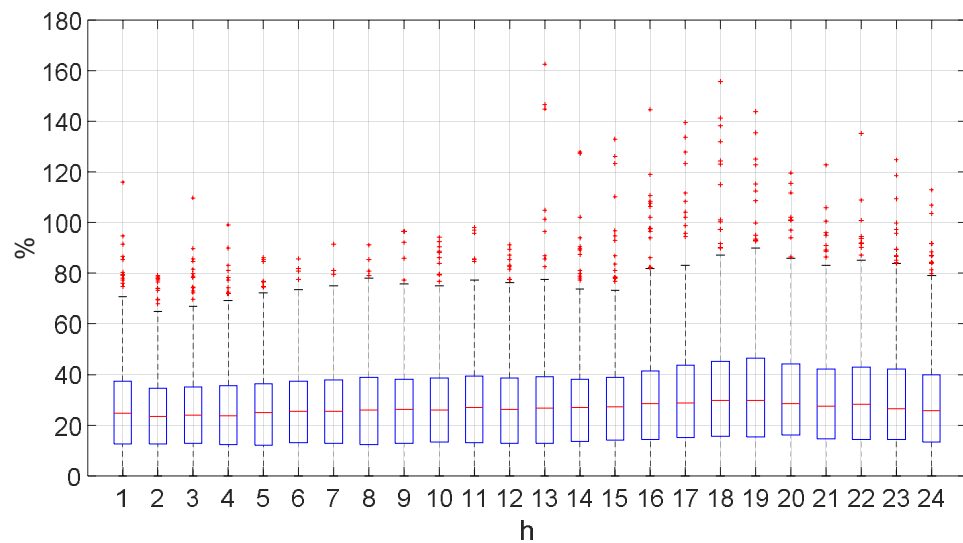
**Kuva 31.** 100 % nimelliskuormituksen ylityksen tekevien muuntajien lukumäärä tietyn tunnin kohdalla Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Suurin maksimikuormitusprosentti on noin 168 % ja pienin maksimikuormitusprosentti on noin 34 %. Tarkasteltavassa verkossa muuntajien 100 % nimelliskuormitus ylittyy vuoden aikana 342 tunnin kohdalla. Näistä tunneista 18:sta kerralla 100 % ylityksen koekavia muuntajia on samaan aikaan useampi kuin yksi ja vain yhden tunnin aikana muuntajia on useampi kuin kaksi. Nyt huippukuormitukset käyvät jo useasti siedettävillä ylärajoilla, mutta tapahtuvat kuitenkin usein vain yksittäisissä muuntajissa. Mielenkiintoisimmat tilanteet ovat kesällä tapahtuneet kolmen muuntajan ylikuormitukset ja kesän aikana tapahtuneet ylikuormitukset muutenkin.

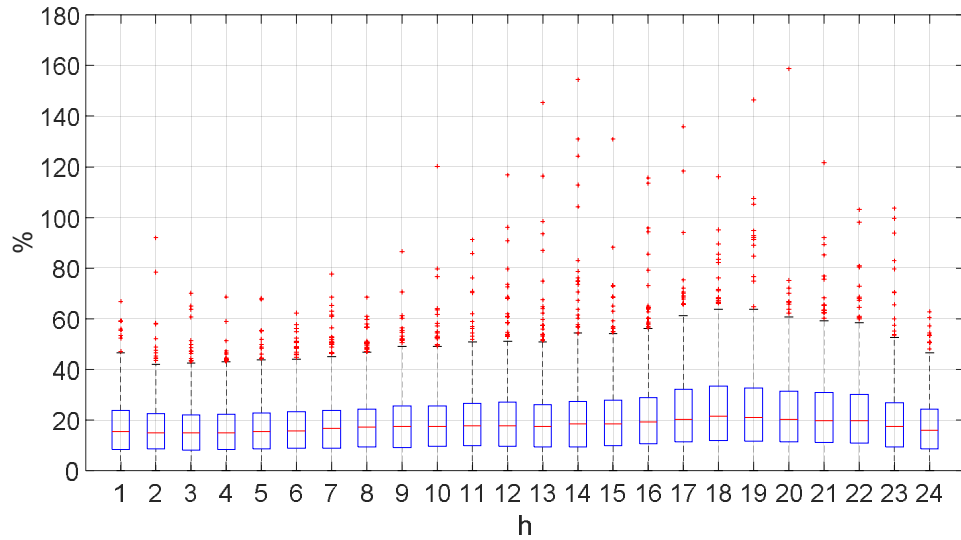
Kuvissa 32–37 on tarkasteltu jokaisen vuorokauden tunnin kohdalta muuntajien kuormitusta verkossa. Kuvat ovat tehty erikseen arkipäiville, lauantapäiville ja sunnuntapäiville. Samoin erikseen kesäajalle ja talviajalle.



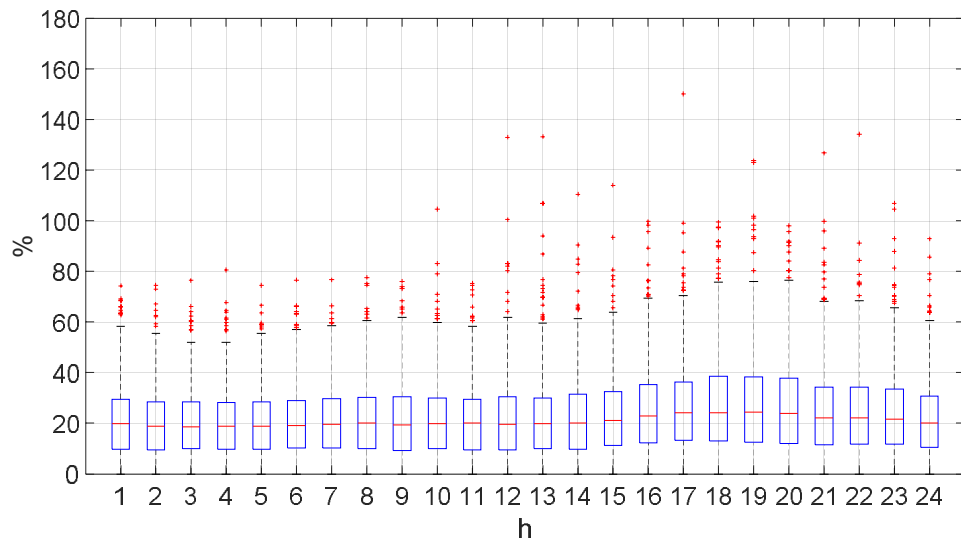
**Kuva 32.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina arkipäivisin Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



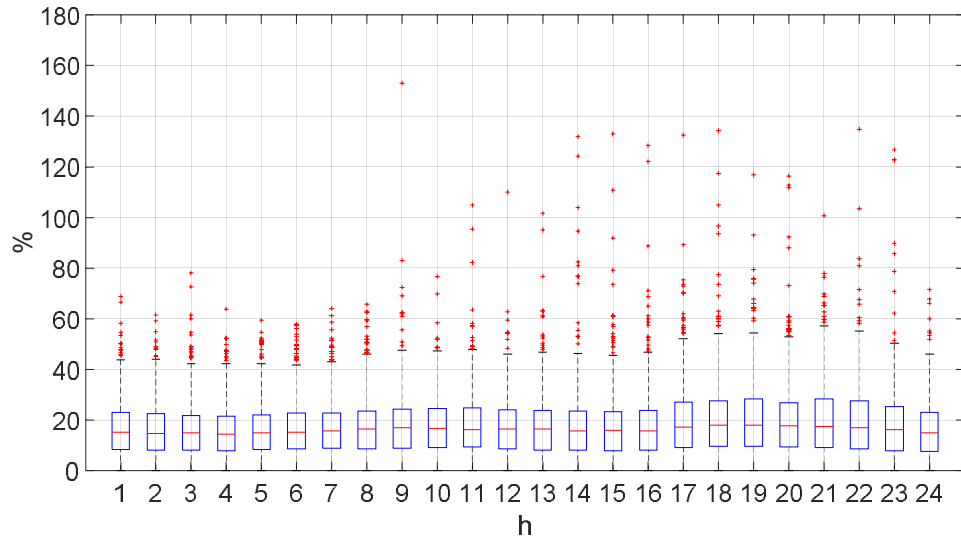
**Kuva 33.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina arkipäivisin Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



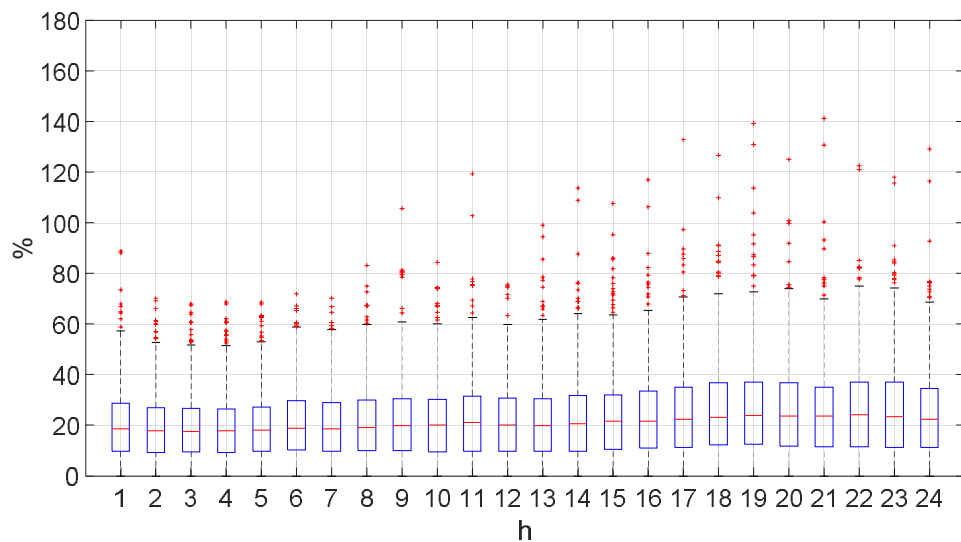
**Kuva 34.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina lauantapäivinä Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



**Kuva 35.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina lauantapäivinä Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



**Kuva 36.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina sunnuntaipäivinä Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

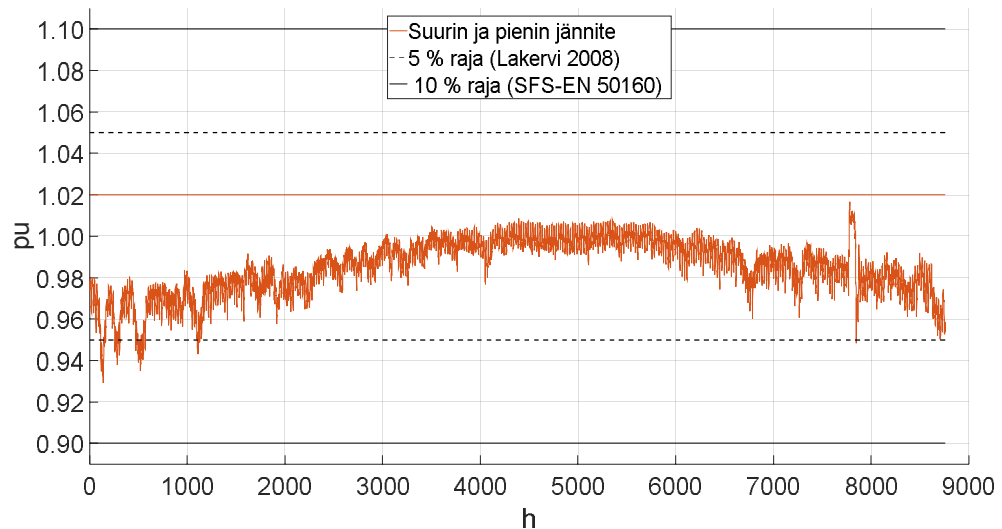


**Kuva 37.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina sunnuntaipäivinä Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Yllä olevista kuvista nähdään, että suurin määrä muuntajista on kesäisin noin 0–70 % kuormituksessa. Talvisin kuormitukset ovat noin 0–90 %. Arkipäivät, illat ja talviaika erotuvat edelleen hieman suuremmilla kuormilla. Nyt suurin kuormitus näkyy kuvassa 33 talviarkipäivänä klo 13 ja osuu paremmin yleiseen kuvaan korkeammista kuormituksista.

## 4.5.2 Jännitetaso

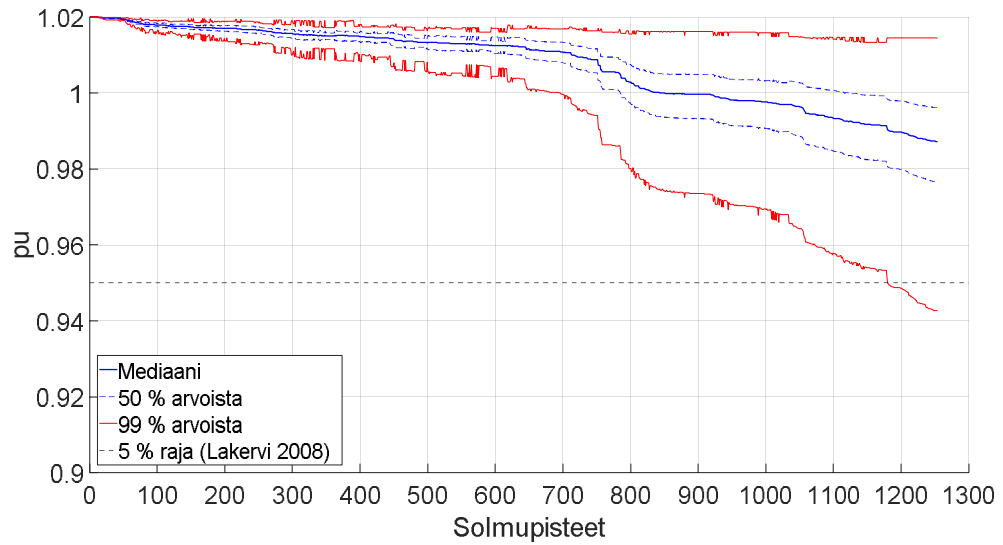
Kuvassa 38 on näkyvissä muuntajien ensiöpuolen, eli 20 kV puolen eniten poikkeava vaihejännite solmupisteissä verrattuna maareferenssipisteeseen jokaisena vuoden tunnina. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.



**Kuva 38.** Verkossa esiintyvä suurin ja pienin jännitetaso jokaiselle vuoden tunnille Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Jännitteet eivät juurikaan muutu alkuperäisestä tilanteesta. Suurin suhteellinen jännite on edelleen noin 1,02 ja pienin on noin 0,93. Jännitetaso ei ylitä, eikä alita standardin SFS-EN 50160:2010 määrittelemiä raja-arvoja jännitteelle minkään tunnin aikana kesijännite puolella. Verkko toimii edelleen samalla tavalla kuin alkuperäisessä tilanteessa. 5 % rajalla jännite on jälleen talviaikaan, mutta nyt se alitetaan alkuvuodesta ja myös loppuvuodesta. Todennäköisesti asiakkaiden liityntäpisteessä ei synny jänniteongelmia vielä tässäkin tilanteessa.

Pienimmän jännitteen vaihtelua verkon solmupisteissä ilman ääriarvoja on tutkittu tarkemmin kuvassa 39. Solmupisteet on järjestetty pienimmän jännitteen mediaanin mukaan laskevaan järjestykseen.

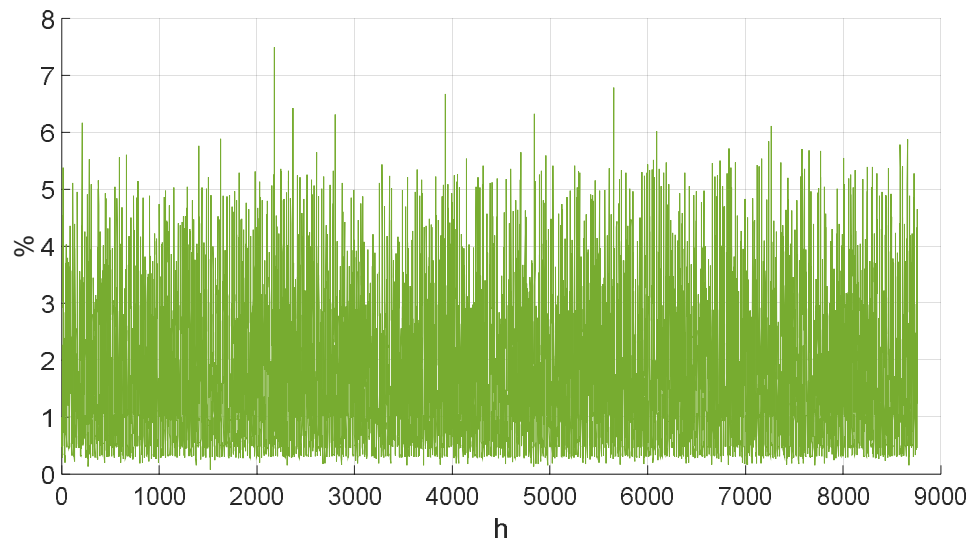


**Kuva 39.** Pienimmän jännitteen vaihtelu verkon jokaisessa solmupisteessä Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Kuvasta nähdään, että jännitetasot solmupisteissä pysyvät melkein samoina alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Puolet solmupisteistä pysyy hyvin maltillisen heilahtelun alueella. Edelleen pysytään kokonaisuudessa melko hyvin 5 % jännitteenaleneman rajoissa, vaikka loppupuolella hajonta onkin suurta.

### 4.5.3 Harmoniset yliaaltojännitteet

Kuvassa 40 näkyy verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille muuntajien toisiopuolelta. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.

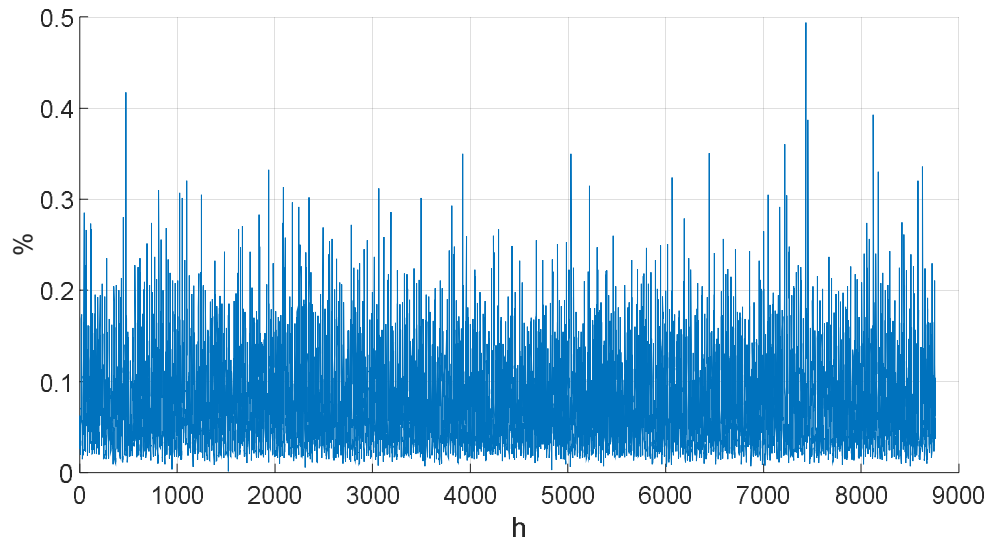


**Kuva 40.** Verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Nyt harmoninen kokonaissärö on nolatasoon verrattuna suurimmillaan noin 7,49 ja pienimmillään 0,08. Arvo ei ylitä vielä standardin SFS-EN 50160:2010 määräämää rajaa tässä tilanteessa, mutta maksimiarvo on hyvin lähellä rajaa.

### 4.5.4 Epäsyyntria

Tässä simuloitiin verkon suurinta epäsymmetrian tilannetta vuoden jokaisen tunnin aikana keskijännitepuolen solmupisteissä. Kuvassa 41 näkyy suurin epäsymmetria jokaisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.

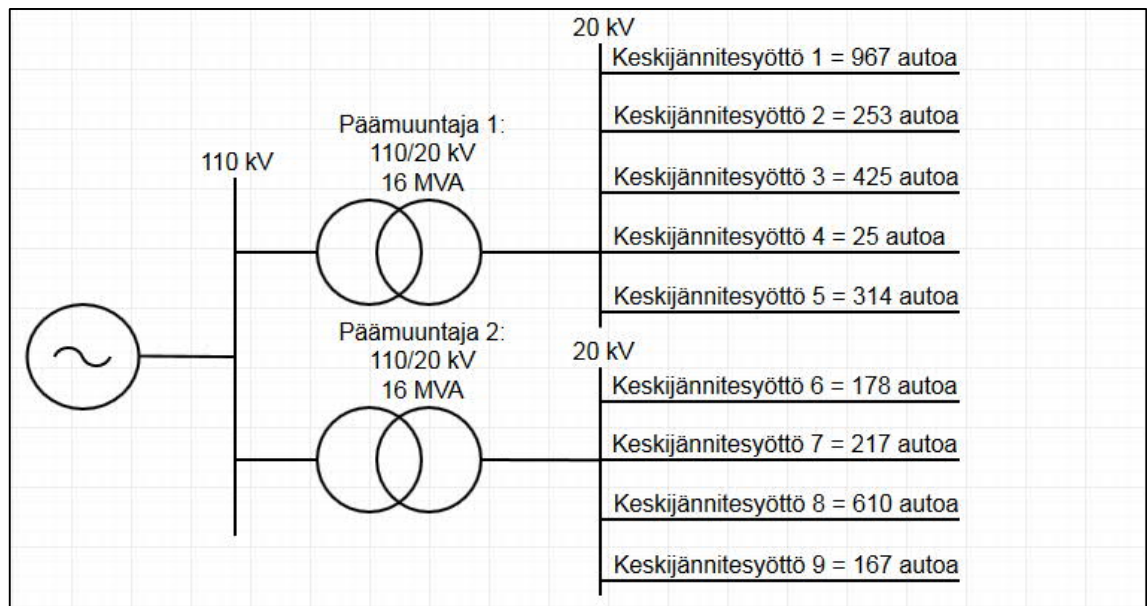


**Kuva 41.** Verkon suurin epäsymmetria vuoden jokaiselle tunnille Suomen asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Maksimim suurin arvo on noin 0,49 % ja pienin 0,00 % Arvot eivät ylitä epäsymmetrialle määrättyjä raja-arvoja standardissa SFS-EN 50160:2010.

## 4.6 EU:n tavoite 2030

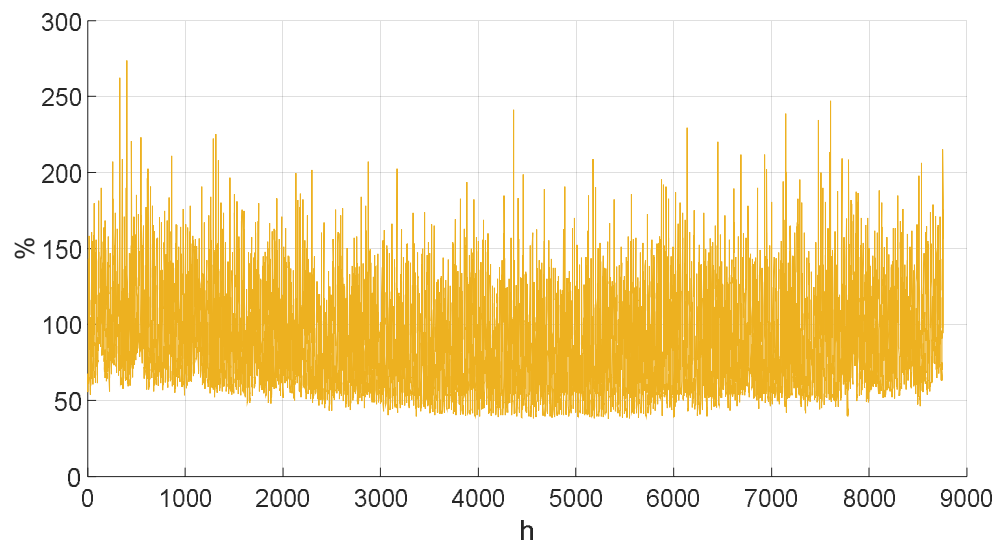
Tässä simuloitiin verkon tilannetta EU:n vuoden 2030 tavoitemäärillä. Taulukko 6 kertoo, että tavoitteen mukaan tarkasteltavan verkon alueella olisi 3157 sähköautoa. Näissä simuloinneissa verkon kuormitus on kasvanut kyseisellä määrällä sähköautoja alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Tämä on jo suuri muutos, koska noin puolet autokannasta verkon alueella on vaihtunut sähköautoiksi. Tarkastellaan eri suureet jälleen erikseen. Kuvassa 42 on näkyvissä autojen määrä eri lähdöillä verkossa.



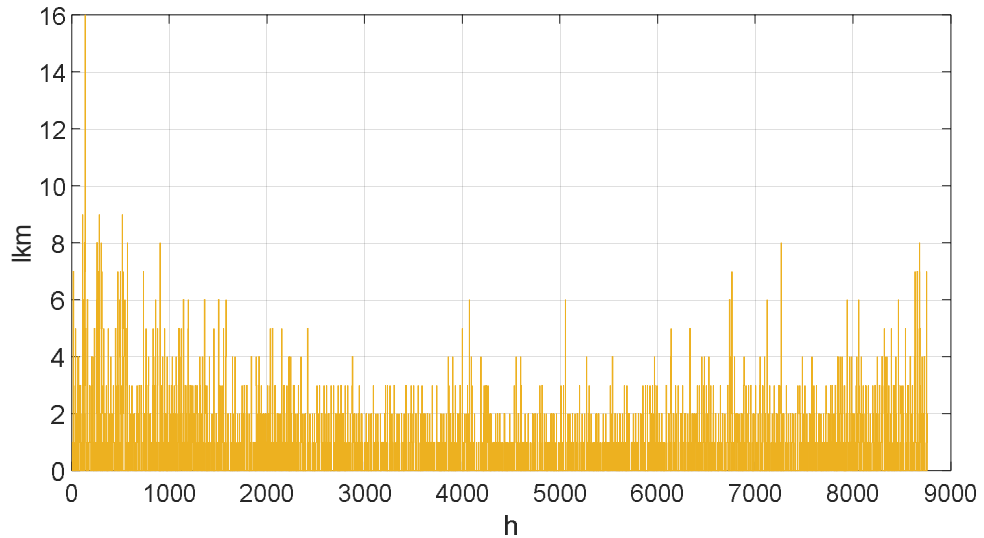
**Kuva 42.** Autojen määrät ja sijoittelut verkossa EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

#### 4.6.1 Kuormitus

Kuvassa 43 on esitetty jokaisen vuoden tunnin aikana tapahtuva muuntajien maksimikuormitusprosentti. Kuvassa 44 näkyy kuinka moni muuntaja ylittää 100 % nimelliskuormitusprosentin kyseisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.



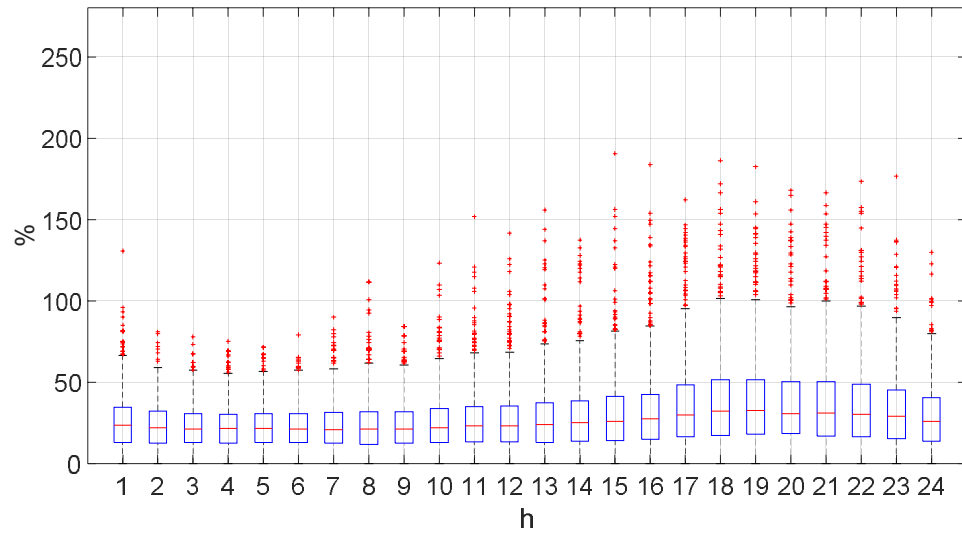
**Kuva 43.** Verkon suurin muuntajien kuormitusprosentti jokaiselle vuoden tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



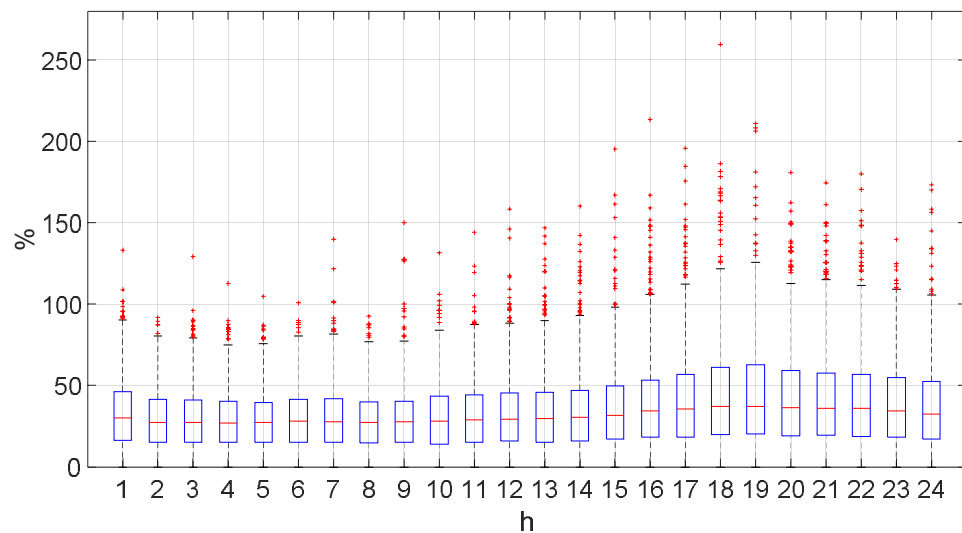
**Kuva 44.** 100 % nimelliskuormituksen ylityksen tekevien muuntajien lukumäärä tietyn tunnin kohdalla EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Suurin maksimikuormitusprosentti on noin 273 % ja pienin maksimikuormitusprosentti on noin 38 %. Tarkasteltavassa verkossa muuntajien 100 % nimelliskuormitus ylittyy vuoden aikana 2497 tunnin kohdalla. Näistä tunneista 1074:llä kerralla 100 % ylityksen kokevia muuntajia on samaan aikaan useampi kuin yksi ja 446 tunnin aikana useampi kuin kaksi. 45 tunnin aikana yli 100 % kuormitettuja muuntajia on samaan aikaan useampi kuin viisi. Pienin maksimikuormitusprosentti on noussut hieman verrattuna muihin tilanteisiin. Tämä pieni nousu voi kuitenkin johtua pelkästään siitä, että autot ovat sijoitettuna eri paikkaan verkossa kuin edellisissä tilanteissa. Nyt kuitenkin huippukuormitukset ovat nousseet niin suuriksi, että edes lämpötilan vaihtuminen pakkaselle talvella ei kompensoi kuormitusta. Noin 28 % vuoden ajasta on yksi tai useampi muuntaja ylikuormassa. Tätä tapahtuu niin kesällä kuin talvella.

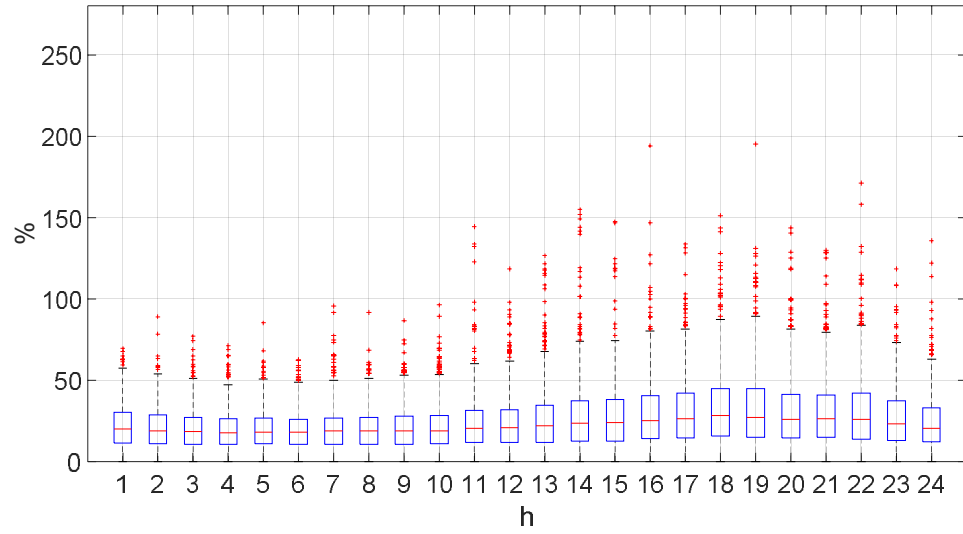
Kuvissa 45–50 on tarkasteltu jälleen jokaisen vuorokauden tunnin kohdalta muuntajien kuormitusta verkossa. Kuvat ovat tehty erikseen arkipäiville, lauantapäiville ja sunnuntapäiville. Samoin erikseen kesäajalle ja talviajalle.



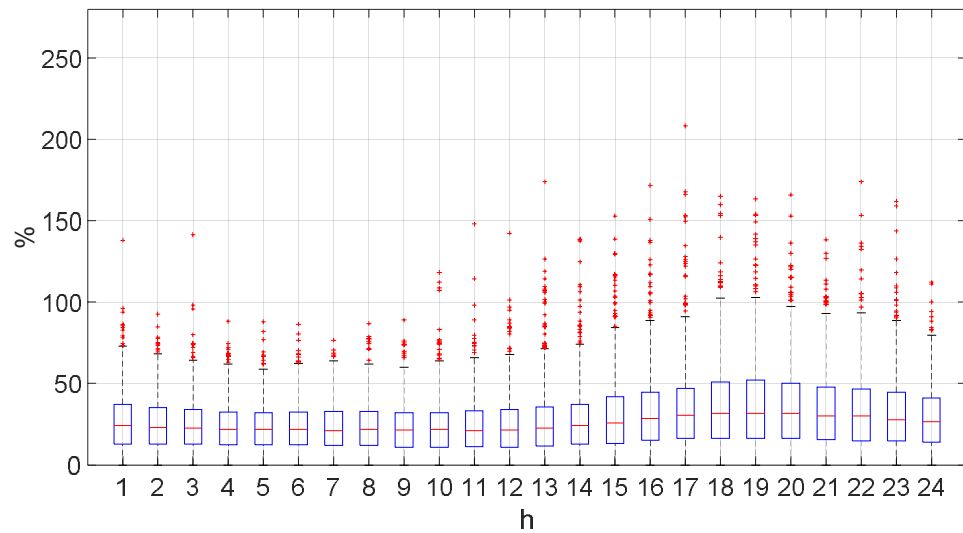
**Kuva 45.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina arkipäivisin EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



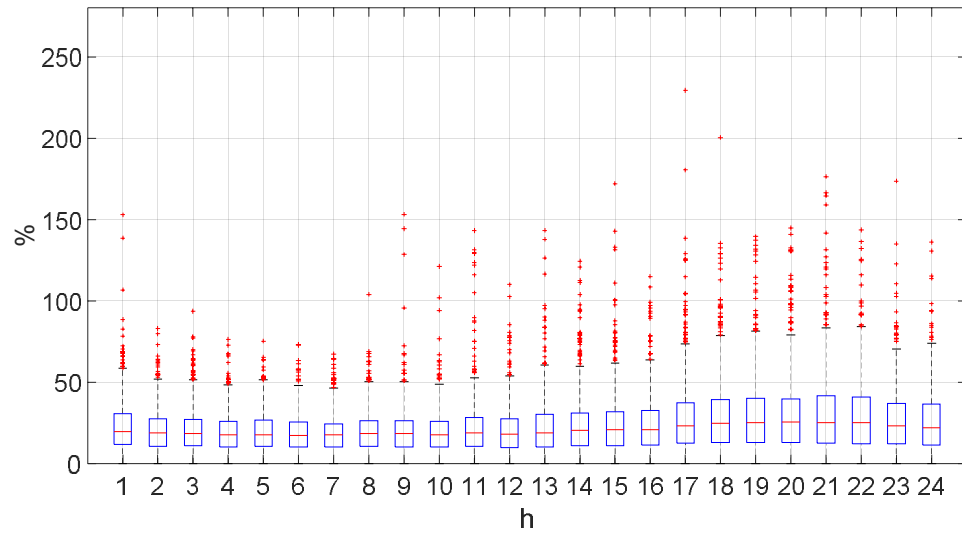
**Kuva 46.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina arkipäivisin EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



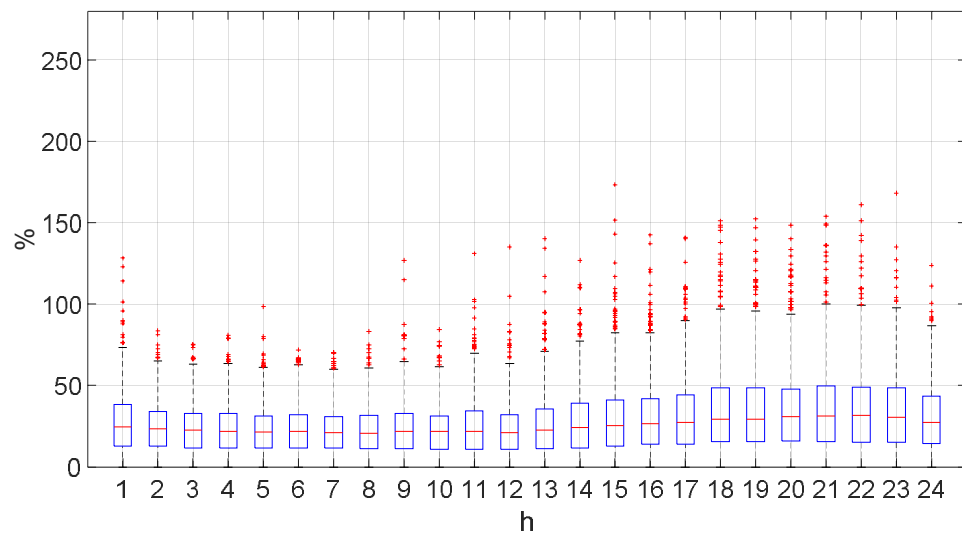
**Kuva 47.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina lauantapäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



**Kuva 48.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina lauantapäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.



**Kuva 49.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina sunnuntaipäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

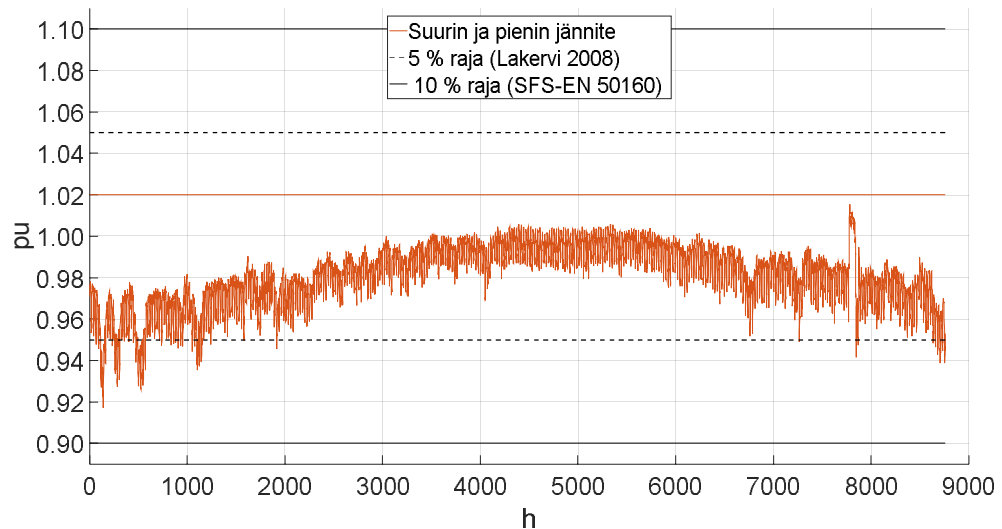


**Kuva 50.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina sunnuntaipäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Yllä olevista kuvista nähdään, että suurin määrä muuntajista on kesäisin noin 0–100 % kuormituksessa. Talvisin kuormitukset ovat noin 0–130 %. Arkipäivät, illat ja talviaika erottuvat jälleen hieman suuremmilla kuormilla. Erityisesti kesäisten ja talvisten arkipäivien iltojen ero on suurentunut. Suurin kuormitus näkyy kuvassa 46 talviarkipäivänä klo 18. Tämä osuu erittäin hyvin yleiseen kuvaan korkeammista kuormituksista.

## 4.6.2 Jännitetaso

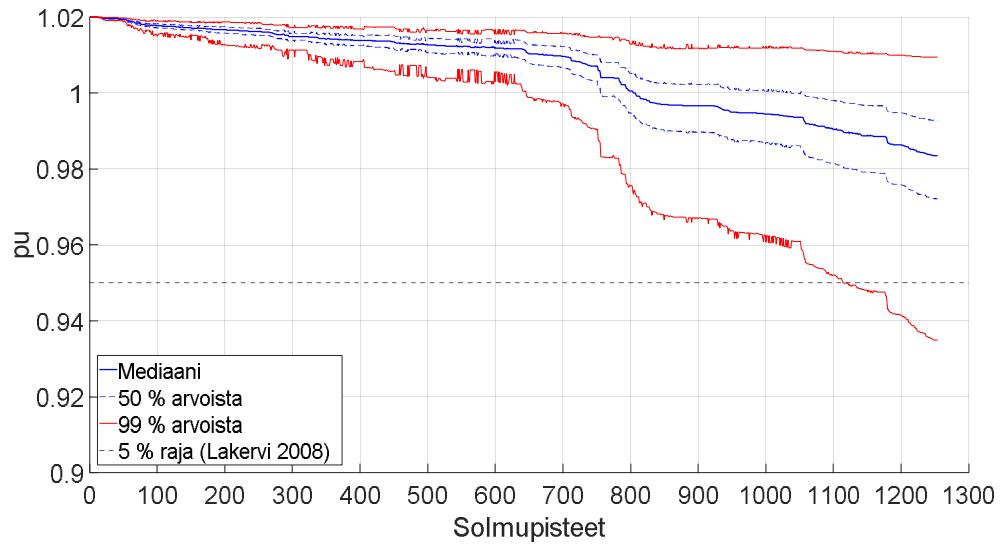
Kuvassa 51 on näkyvissä muuntajien ensiöpuolen, eli 20 kV puolen eniten poikkeava vaihejännite solmupisteissä verrattuna maareferenssipisteeseen jokaisena vuoden tunnina. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.



**Kuva 51.** Verkossa esiintyvä suurin ja pienin jännitetaso jokaiselle vuoden tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Jännitteet eivät juurikaan muutu alkuperäisestä tilanteesta. Suurin suhteellinen jännite on edelleen noin 1,02, mutta pienin on nyt noin 0,92. Jännitetaso ei ylitä eikä alita standardin SFS-EN 50160:2010 määrittelemiä raja-arvoja jännitteelle minkään tunnin aikana kesijännite puolella. Verkko toimii vielä hyvin, mutta standardin alaraja alkaa lähestyä talvisin. 5 % rajan tuntumassa tai sen alapuolella jännite on nyt noin puolet vuodesta. Joidenkin asiakkaiden liityntäpisteissä jännite voi jo olla ongelmallinen.

Pienimmän jännitteen vaihtelua verkon solmupisteissä ilman ääriarvoja on tutkittu tarkemmin kuvassa 52. Solmupisteet on järjestetty pienimmän jännitteen mediaanin mukaan laskevaan järjestykseen.

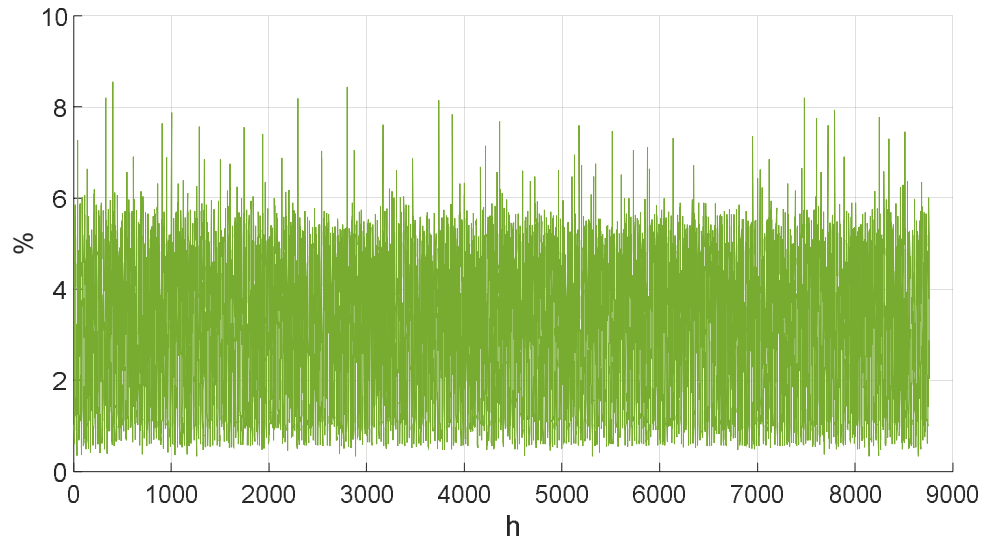


**Kuva 52.** Pienimmän jännitteen vaihtelu verkon jokaisessa solmupisteessä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Kuvassa muoto on edelleen hyvin samanlainen kuin aiemmissa tilanteissa. Kuvaajan loppupään solmupisteiden jännitetaso on kuitenkin nyt huomattavasti tippunut. Kuvaajan alkupään solmupisteiden jännitetasot eivät juurikaan ole muuttuneet vaan kuormituksen muutos näkyy vain loppupäässä. 5 % jännitteenaleneman ylitystä tapahtuu loppupäässä huomattavasti enemmän kuin aiemmin.

### 4.6.3 Harmoniset yliaaltojännitteet

Kuvassa 53 näkyy verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille muuntajien toisiopuolelta. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.

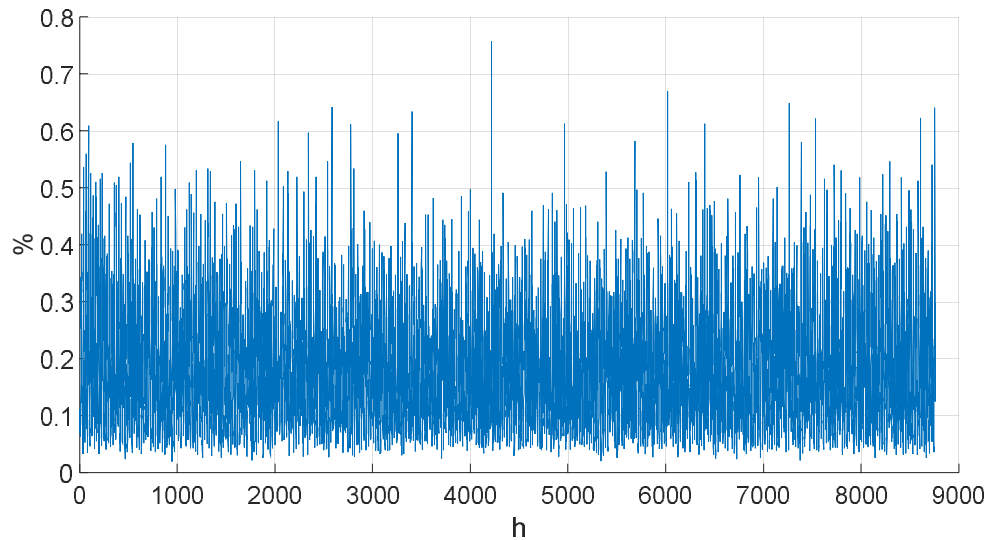


**Kuva 53.** Verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Harmoninen kokonaissärö on nollassa verrattuna suurimmillaan noin 8,54 ja pienimmillään 0,33. Tällä kertaa maksimiarvo ylittää standardin SFS-EN 50160:2010 määräämän rajan 6 tunnin aikana.

### 4.6.4 Epäsyyntia

Tässä simuloidaan verkon suurinta epäsymmetrian tilannetta vuoden jokaisen tunnin aikana keskijännitepuolen solmupisteissä. Kuvassa 54 näkyy suurin epäsymmetria jokaisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.

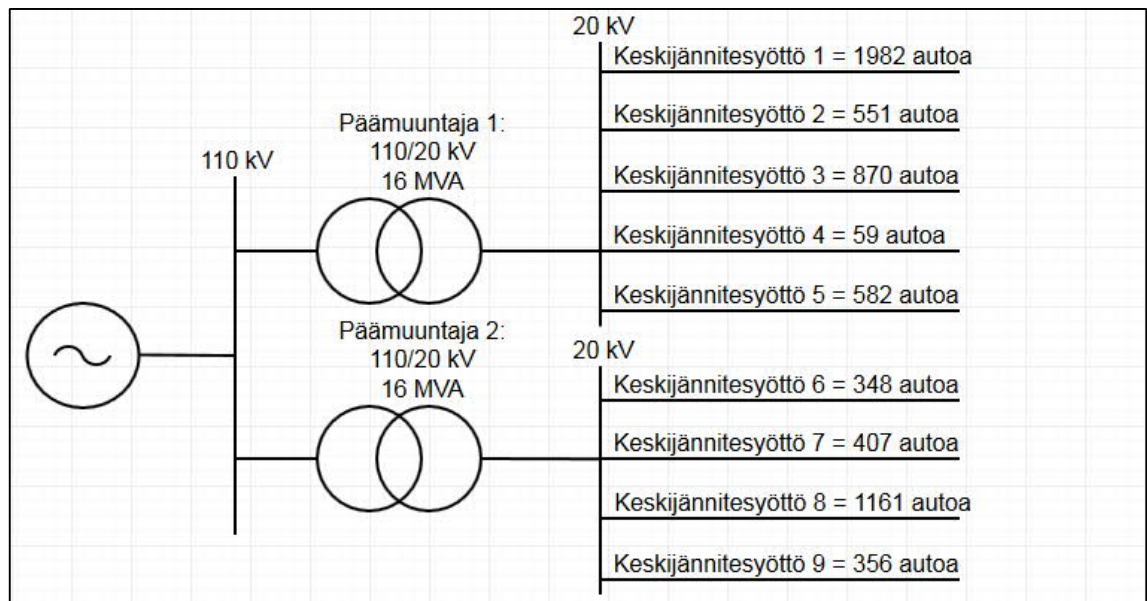


**Kuva 54.** Verkon suurin epäsymmetria vuoden jokaiselle tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2030.

Nyt maksimin suurin arvo on noin 0,76 % ja pienin 0,00 % Arvot eivät ylitä epäsymmetrialle määrättyjä raja-arvoja standardissa SFS-EN 50160:2010.

#### 4.7 EU:n tavoite 2050

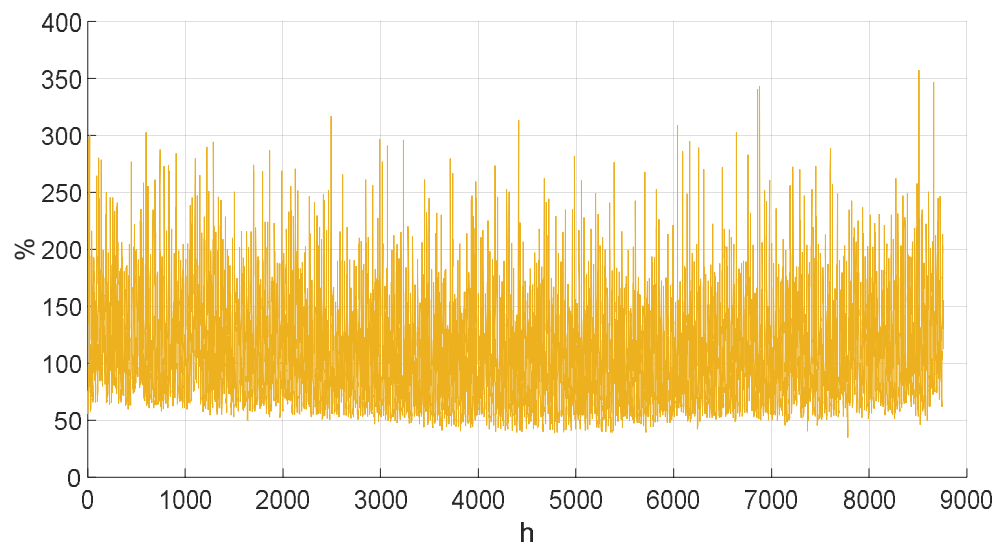
Tässä simuloitiin verkon tilannetta EU:n vuoden 2050 tavoitemäärillä. Taulukko 6 kertoo, että tavoitteen mukaan tarkasteltavan verkon alueella olisi 6316 sähköautoa. Näissä simuloinneissa verkon kuormitus on kasvanut kyseisellä määrällä sähköautoja alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Tämä muutos on todella suuri, koska käytännössä koko autokanta verkon alueella on vaihtunut sähköautoiksi. Tarkastellaan eri suureet jälleen erikseen. Kuvassa 55 on näkyvissä autojen määrä eri lähdöillä verkossa.



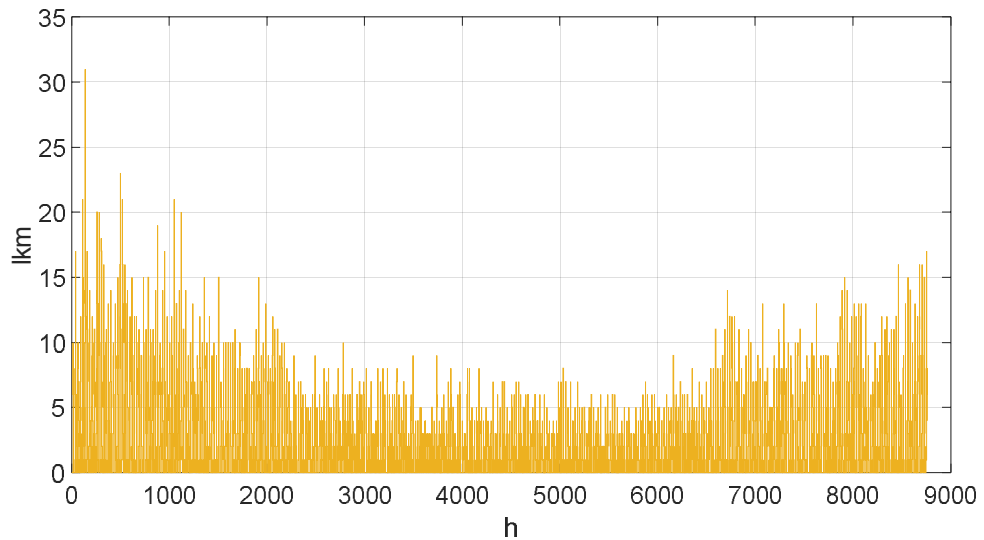
**Kuva 55.** Autojen määrät ja sijoittelut verkossa EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

#### 4.7.1 Kuormitus

Kuvassa 56 on esitetty jokaisen vuoden tunnin aikana tapahtuva muuntajien maksimikuormitusprosentti. Kuvassa 57 näkyy kuinka moni muuntaja ylittää 100 % nimelliskuormitusprosentin kyseisen tunnin aikana. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.



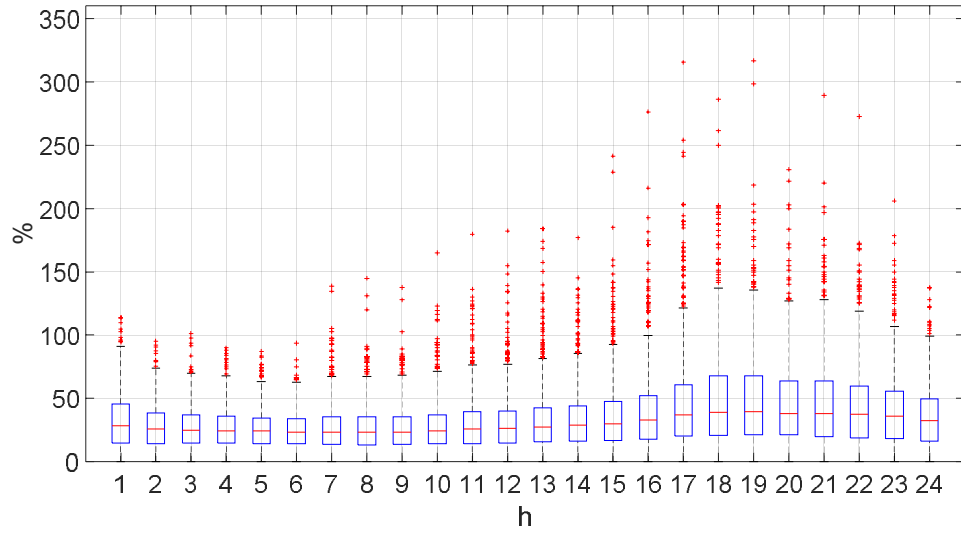
**Kuva 56.** Verkon suurin muuntajien kuormitusprosentti jokaiselle vuoden tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.



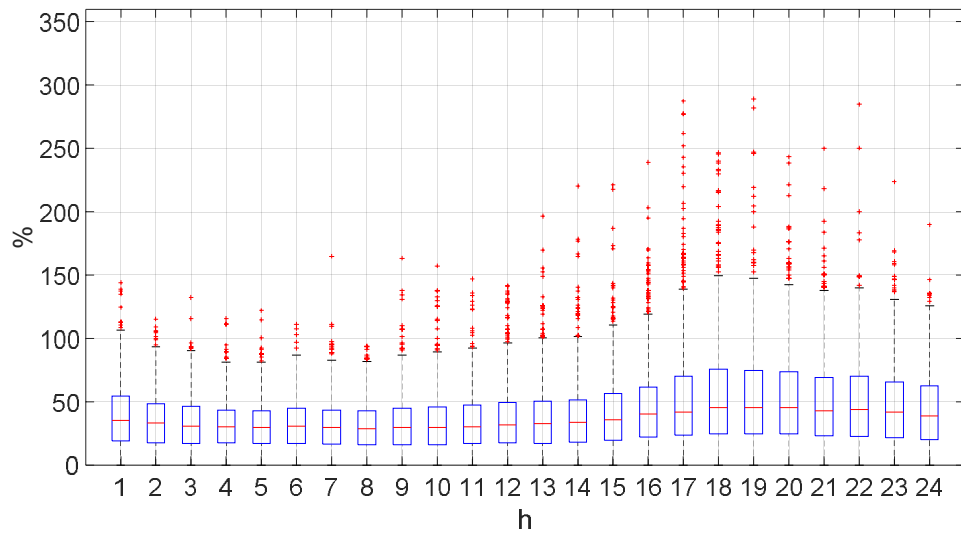
**Kuva 57.** 100 % nimelliskuormituksen ylityksen tekevien muuntajien lukumäärä tietyn tunnin kohdalla EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

Suurin maksimikuormitusprosentti on noin 357 % ja pienin maksimikuormitusprosentti on noin 35 %. Tarkasteltavassa verkossa muuntajien 100 % nimelliskuormitus ylittyy vuoden aikana 4023 tunnin kohdalla. Näistä tunneista 2761:llä kerralla 100 % ylityksen kokevia muuntajia on samaan aikaan useampi kuin yksi ja 2047 tunnin aikana useampi kuin kaksi. 870 tunnin aikana yli 100 % kuormitettuja muuntajia on samaan aikaan useampi kuin viisi. Pienin maksimikuormitusprosentti ei ole täysin linjassa edellisiin tilanteisiin verrattuna, mutta vain hieman koholla alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Huipukuormitukset ovat kuitenkin todella korkeita. Noin 49 % vuoden ajasta on yksi tai useampi muuntaja ylikuormassa. Ylikuormitusta tapahtuu läpi vuoden. Näin suurta kuormitusta muuntajat eivät tule kestäämään jatkuvasti.

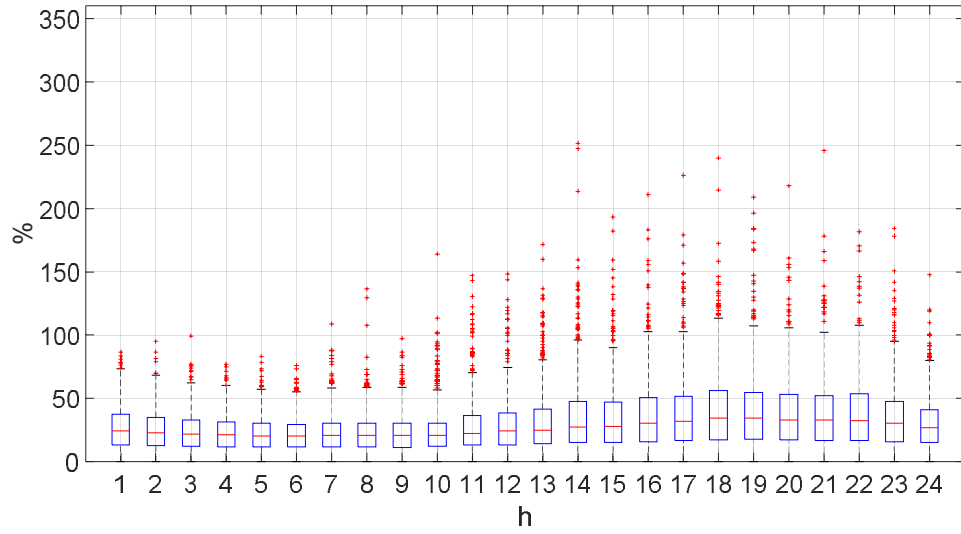
Kuvissa 58–63 on tarkasteltu jälleen jokaisen vuorokauden tunnin kohdalta muuntajien kuormitusta verkossa. Kuvat ovat tehty erikseen arkipäiville, lauantapäiville ja sunnuntapäiville. Samoin erikseen kesäajalle ja talviajalle.



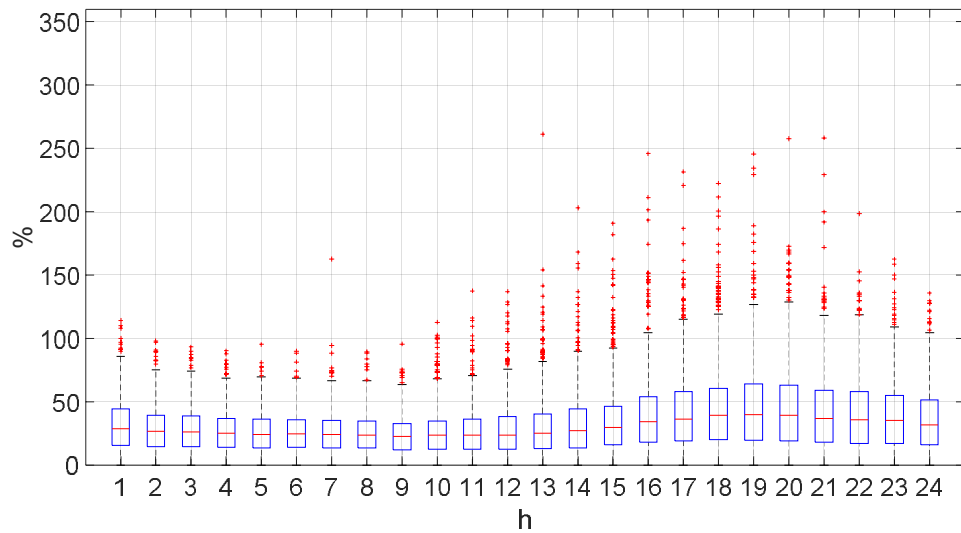
**Kuva 58.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina arkipäivisin EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.



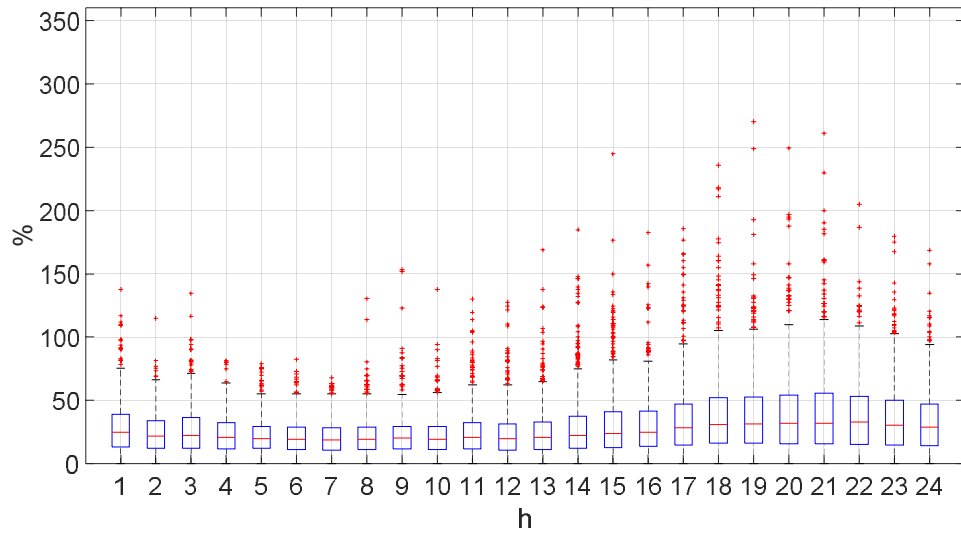
**Kuva 59.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina arkipäivisin EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.



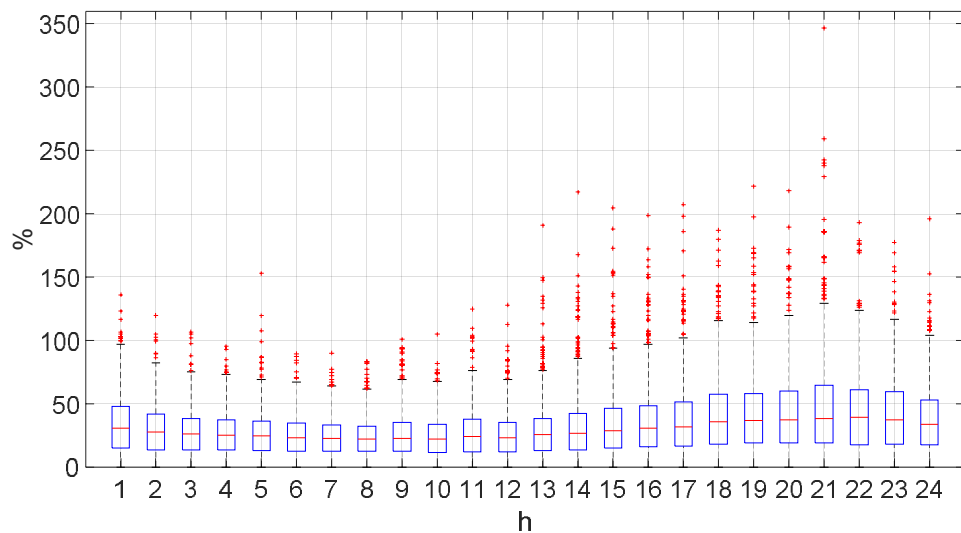
**Kuva 60.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina lauantapäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.



**Kuva 61.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina lauantapäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.



**Kuva 62.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana kesäkuukausina sunnuntaipäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

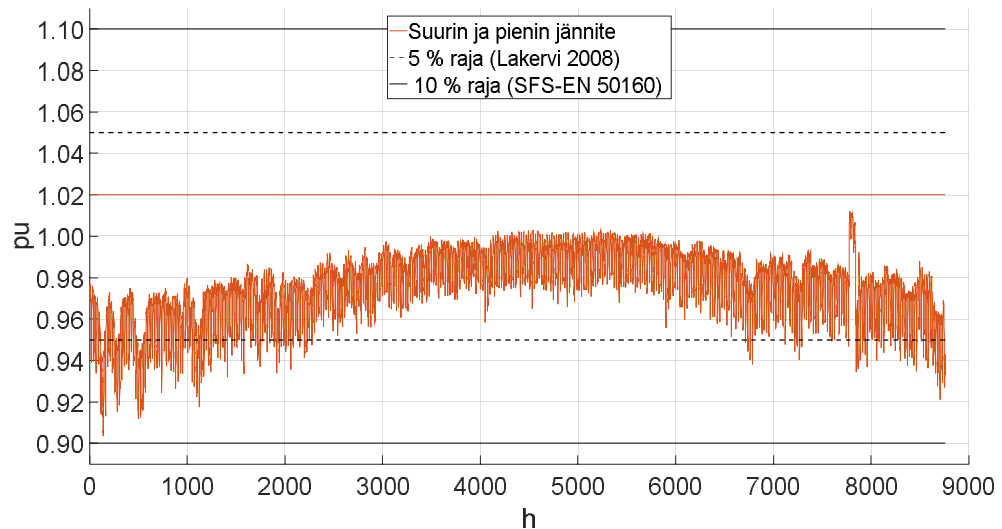


**Kuva 63.** Kaikkien muuntajien kuormituksen jakautuminen verkossa tietyn tunnin aikana talvikuukausina sunnuntaipäivinä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

Yllä olevista kuvista nähdään, että suurin määrä muuntajista on kesäisin noin 0–140 % kuormituksessa. Talvisin kuormitukset ovat noin 0–150 %. Arkipäivät, illat ja talviaika erottuvat taas hieman suuremmilla kuormilla. Tällä kertaa suurin kuormitus löytyy talviajalta sunnuntaipäiviltä. Se näkyy kuvassa 63 illalla klo 21 kohdalla.

## 4.7.2 Jännitetaso

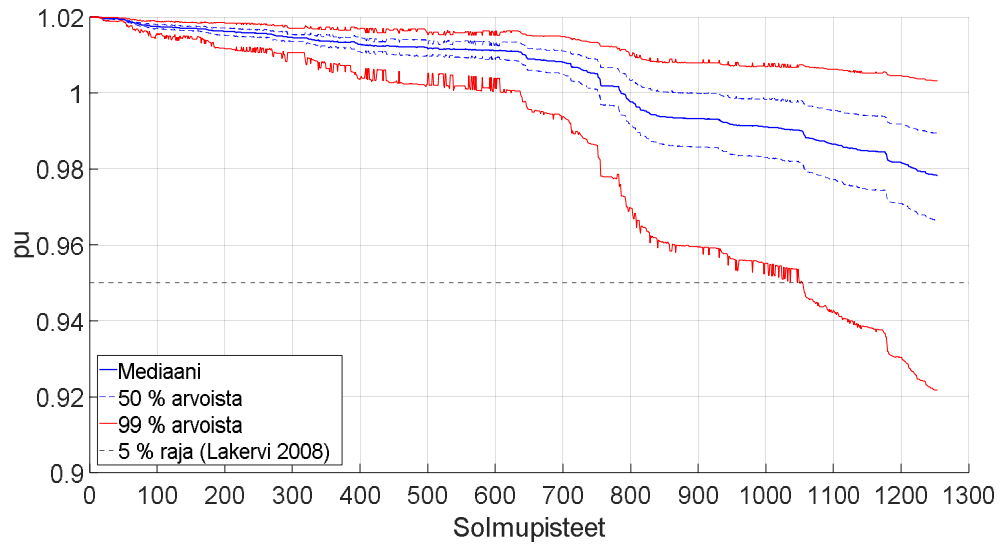
Kuvassa 64 on näkyvissä muuntajien ensiöpuolen, eli 20 kV puolen eniten poikkeava vaihejännite solmupisteissä verrattuna maareferenssipisteeseen jokaisena vuoden tunnina. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.



**Kuva 64.** Verkossa esiintyvä suurin ja pienin jännitetaso jokaiselle vuoden tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

Jännitteet eivät juurikaan muutu edellisistä tilanteista. Suurin suhteellinen jännite on nyt noin 1,02 ja pienin on jo noin 0,90. Jännitetaso ei ylitä, eikä alita standardin SFS-EN 50160:2010 määrittelemiä raja-arvoja jännitteelle minkään tunnin aikana keskijännite puolella. Pienin jännite on kuitenkin sama kuin standardin alaraja normaaleissa olosuhteissa. Verkko toimii edelleen, mutta jännite ei voi laskea yhtään enempää talviaikana. 5 % rajan yläpuolella pysytään vain kesäisin. Tästä aiheutuu ongelmia asiakkaiden liittytäpisteessä, ellei jännitettä saada nostettua.

Pienimmän jännitteen vaihtelua verkon solmupisteissä ilman ääriarvoja on tutkittu tarkemmin kuvassa 65. Solmupisteet on järjestetty pienimmän jännitteen mediaanin mukaan laskevaan järjestykseen.

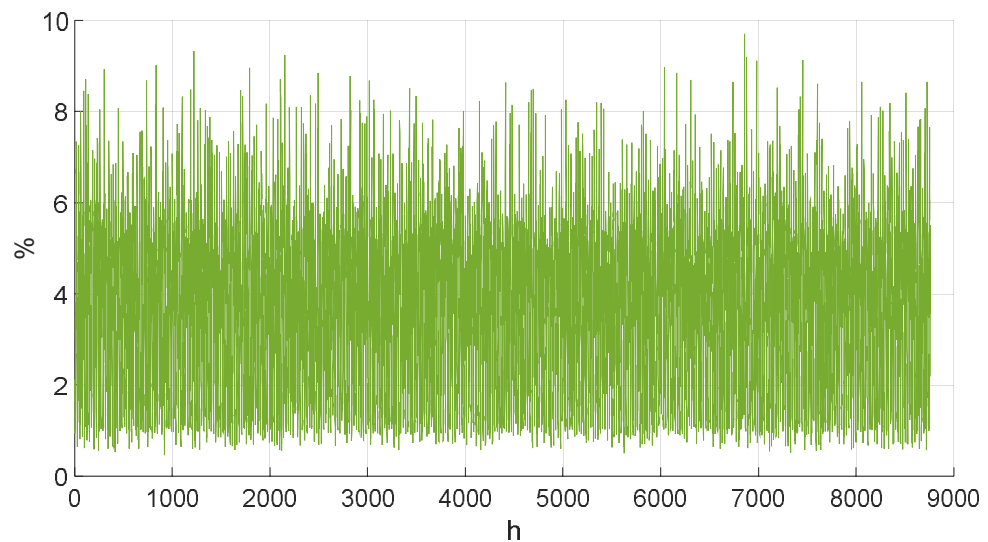


**Kuva 65.** Pienimmän jännitteen vaihtelu verkon jokaisessa solmupisteessä EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

Kuvassa muoto pysyy edelleen samanlaisena kuin aiemmissa tilanteissa. Nyt kuitenkin kuvaajassa erittäin monen loppupään solmupisteen jännitetaso on laskenut alle 5 % jännitteenaleneman rajan. Kuvaajan alkupään solmupisteiden jännitetasot ovat myös pudonneet hieman enemmän kuin muissa tilanteissa.

### 4.7.3 Harmoniset yliaaltojännitteet

Kuvassa 66 näkyy verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille muuntajien toisiopuolelta. Tunnit ovat aikajärjestyksessä kuvassa.

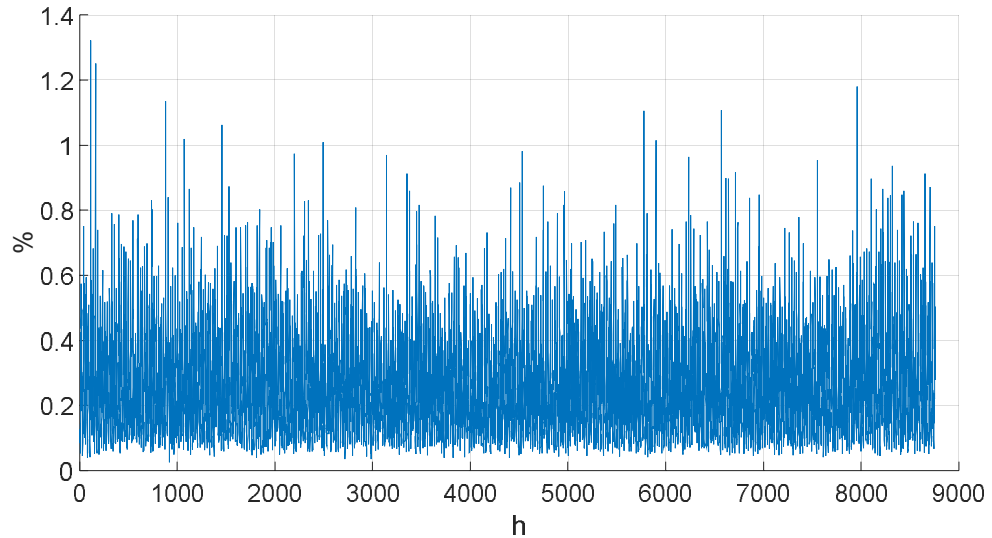


**Kuva 66.** Verkon suurin harmoninen kokonaissärö vuoden jokaiselle tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

Harmoninen kokonaissärö on nollassoon verrattuna suurimmillaan noin 9,70 ja pienimmillään 0,47. Maksimiarvo ylittää standardin SFS-EN 50160:2010 määräämän rajan jopa 76 tunnin aikana.

### 4.7.4 Epäsyyntria

Tässä simuloitiin verkon suurinta epäsymmetrian tilannetta vuoden jokaisen tunnin aikana keskijännitepuolen solmupisteissä. Kuvassa 67 näkyy suurin epäsymmetria. Tunnit ovat aikajärjestyksessä.

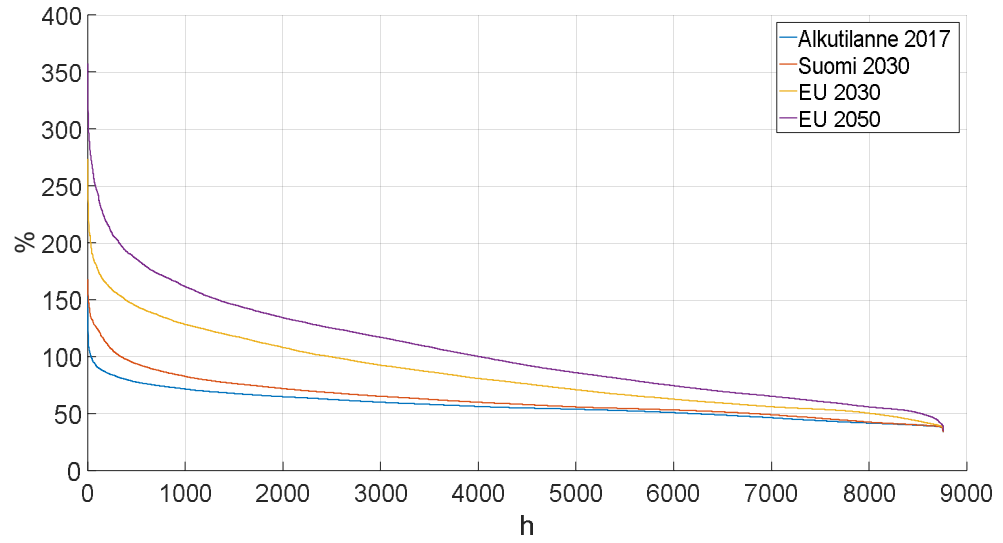


**Kuva 67.** Verkon suurin epäsymmetria vuoden jokaiselle tunnille EU:n asettamassa tavoitteessa vuodelle 2050.

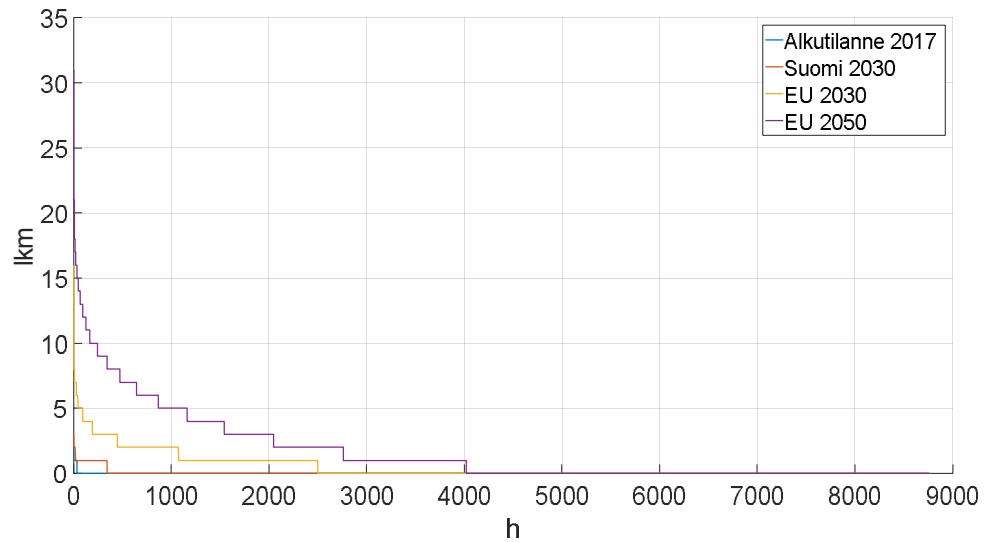
Maksimimäärä on noin 1,32 % ja pienin 0,03 %. Arvot eivät ylitä epäsymmetrialle määrättyjä raja-arvoja standardissa SFS-EN 50160:2010. Suurin arvo kuitenkin alkaa olla jo merkittävä. Joillain jakelumuuntajilla voi olla jo merkittävää vinokuormaa ja yhden vaiheen ylikuormittumista, vaikka koko muuntaja ei olisi vielä ylikuormittunut.

## 4.8 Tilanteiden vertailu

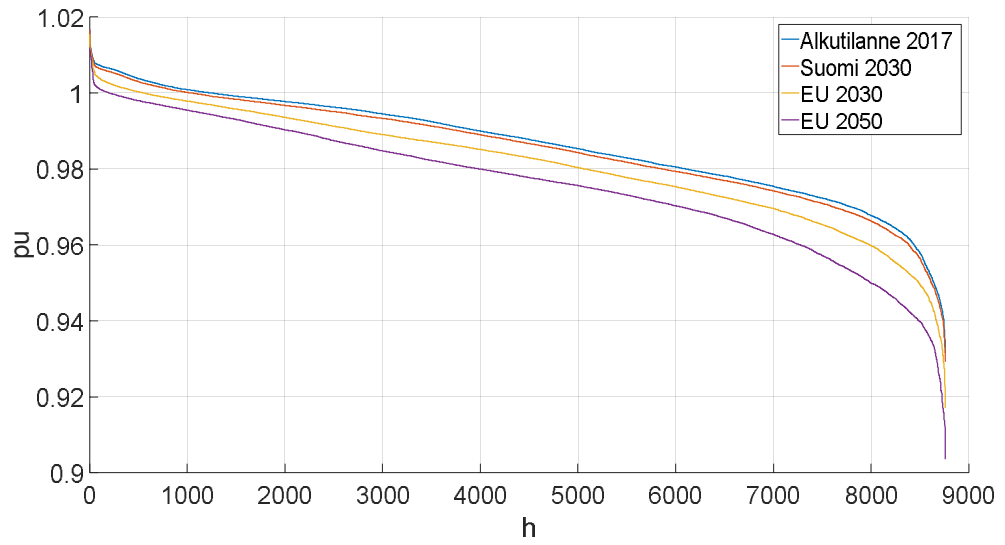
Tässä vertaillaan erilaisien simuloitujen tilanteiden samoja suureita keskenään laskevassa järjestyksessä. Tästä saadaan helposti ymmärrettävä kuva tilanteiden vertailua varten. Kuvissa vuoden tunnit eivät ole enää aikajärjestyksessä. Kuvassa 68 on suurimman kuormitusprosentin vertailu. Kuvassa 69 on samaan aikaan ylikuormittuneiden muuntajien lukumäärien vertailu. Kuvassa 70 on minimijännitteiden vertailu. Kuvassa 71 on suurimman harmonisen kokonaissärön vertailu. Kuvassa 72 on suurimman epäsymmetrian vertailu.



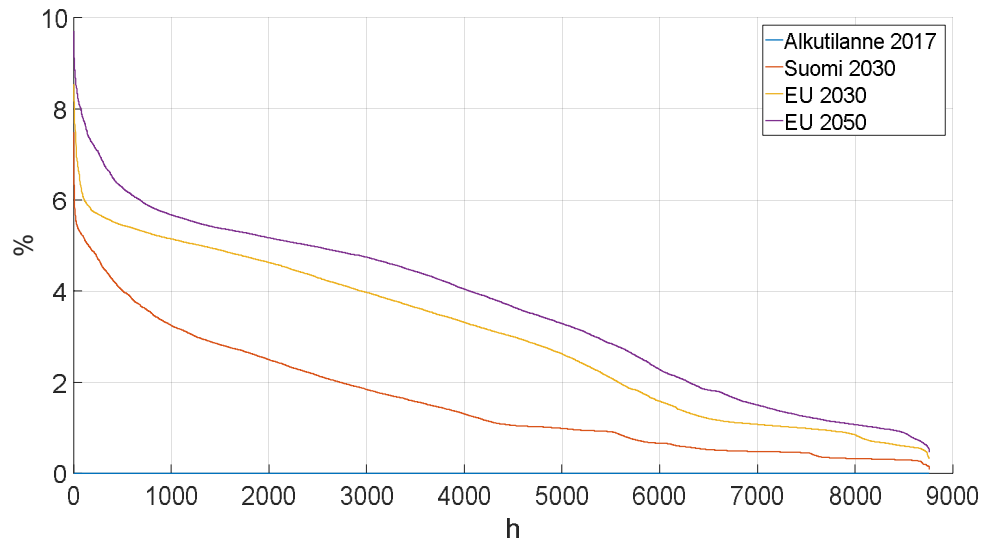
**Kuva 68.** Suurimman kuormitusprosentin vertailu eri tavoitteiden kesken.



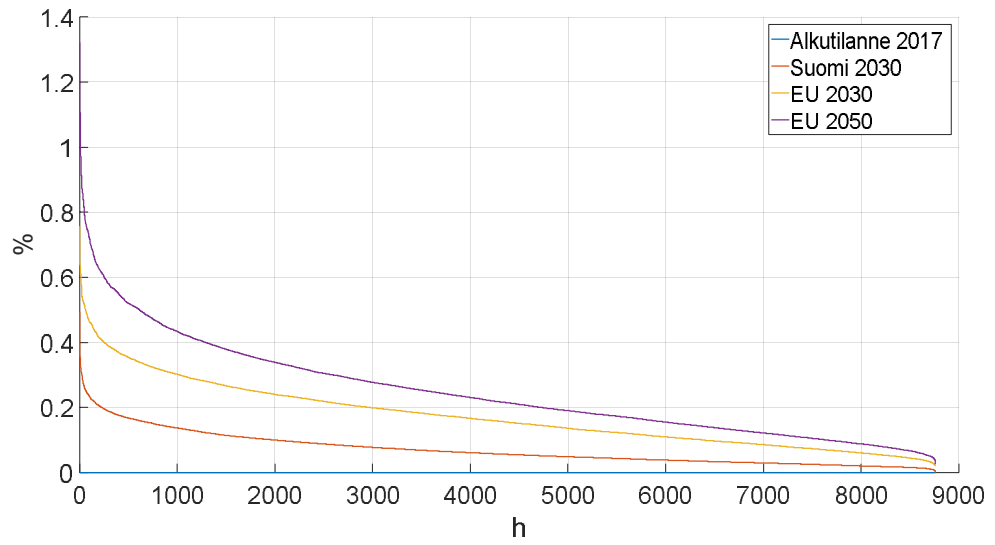
**Kuva 69.** Samaan aikaan ylikuormittuneiden muuntajien lukumäärän vertailu eri tavoitteiden kesken.



**Kuva 70.** Minimijännitteiden vertailu eri tavoitteiden kesken.



**Kuva 71.** Suurimman harmoninen kokonaissärön vertailu eri tavoitteiden kesken.



**Kuva 72.** Suurimman epäsymmetrian vertailu eri tavoitteiden kesken.

## 5. YHTEENVETO

Työn tuloksia tarkastellessa oli huomioitava, että lähtöarvoihin liittyi runsaasti pyörityksiä ja oletuksia. Esimerkiksi autojen määrä tarkasteltavan verkon alueella lähtötilanteessa oli arvio, joka oli luotu Pirkanmaalla rekisteröityneiden autojen perusteella. Vaikka auto olisi rekisteröity Pirkanmaalle, se ei välttämättä ole pääsääntöisesti käytössä juuri siellä. Huomioon ei otettu sitä, että autojen kokonaisuusmuutos muuttuu vertailtavien vuosien välissä, vaan sen oli oletettu pysyvän samana. Todellisuudessa ajoneuvokanta varmaan kasvaa, mutta välttämättä sähköajoneuvokanta ei kasva samassa suhteessa. Työssä polttomootoriautot ja muut autot oli vain muutettu sähköautoiksi ja ladattaviksi hybrideiksi tietyillä suhteilla eri tavoitteissa. Ennusteissa ja tavoitteissa on varmasti eroja maantieteellisen paikan suhteen. Kaupungissa sähköajoneuvojen yleistymisen voi olla täysin eri suuruusluokkaa kuin maaseudulla. Sähköverkkoa tullaan todennäköisesti tulevaisuudessa myös saneeraamaan ja sinne voidaan mahdollisesti lisätä hajautettua energiatuotantoa. Tässä työssä näitä ei ole otettu huomioon.

Latauksissa oli paljon epävarmuutta. Todellisuudessa lataustehot voivat olla ja todennäköisesti ovatkin eri suuruiset kuin tämän työn simuloinneissa käytetyt suhteet. Latauspisteet voivat sijaita tulevaisuudessa eri paikoissa, kuin tässä työssä oli ennustettu. Tässä diplomityössä tutkittiin vain kotilatauksen vaikutusta. Simuloinneissa ei ollut joukkoliikenteen profiilille sopivia latausaikoja. Ulkopuolelle jätettiin myös erilliset tehollataus-asetat ja työpaikkalataaminen. Työssä oletettiin, että sähköajoneuvoja ladattiin kerran päivässä täyteen yhdessä paikassa. Todellisuudessa sähköajoneuvoja voidaan ladata useita kertoja päivässä ja lyhyempiä aikoja. Talvi vaikuttaa sähköajoneuvojen kulutukseen ja lataukseen, mutta sitä ei voitu ottaa huomioon täydellisesti simuloinneissa. Samoin sähköautojen ja ladattavien hybridiautojen välillä on eroja niiden käytössä ja latauksessa. Niiden määrien suhde voi muuttua huomattavasti vuosien kuluessa. Nyt se oli pidetty vakiona ja käytetty samaa lataustehojen suhdetta kaikille eri tavoitteille eri vuosina. Aivan kaikille asiakkaille tarkasteltavan verkon alueella ei saatu kuormitusmittausta ja näiden kulutus oletettiin nolaksi.

Tulevaisuutta on hyvin vaikea ennustaa tarkasti. Simulointien pohjana kuitenkin käytettiin hyviä saatavissa olevia lähtötietoja. Näillä saatiin simuloitua neljästä eri tilanteesta tulokset. Seuraavaksi tarkastellaan järjestyksessä kaikki simuloitujen verkon suureet.

Kuormitustilannetta simuloitiin tarkasteltavan verkon 20/0,4 kV -muuntajissa. Näissä erityisesti tarkasteltiin 100 % nimelliskuormituksen ylitystä. Ongelmia tarkan analyysin tekemiseen loppupään tavoitteissa aiheutti se, että simulointituloksista oli vaikea nähdä ovatko muuntajat ylikuormituksessa hetkellisesti vai jatkuvasti. Alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa kuitenkin ongelmia ei ollut. Vain harvoja muuntajia oli pienessä ylikuormassa hetkellisesti, ja ne tapahtuivat talvella. Suomen 2030 tavoitteessa alkoi jo näkyä merkittäviä huippukuormituksia. Nämä kuitenkin olivat suurelta osin yksittäisiä muuntajia, jotka kävivät suurilla kuormilla. Näitä oli suhteellisen vähän verrattuna kokonaismäärään. Tästä voidaan vielä selvittää ilman suurempia ongelmia. EU:n vuoden 2030 tavoitteessa huippukuormitukset olivat jo merkittäviä. Niitä ei pystytä kompensoimaan edes pakkasella talvella, ja tätä tapahtuu myös reilusti kesällä. Muuntajia oli useita ylikuormassa samaan aikaan. 28 % vuoden ajasta vähintään yksi muuntaja oli ylikuormittuneena. EU:n vuoden 2050 tavoitteessa huippukuormitukset olivat jo todella suuria. 46 % vuoden ajasta oli verkossa vähintään yksi muuntaja ylikuormittuneena. Ylikuormitusta tapahtui läpi vuoden. Muuntajat eivät tule kestävänsä näin suurta kuormitusta. Suurimmat kuormitukset kaikissa tavoitteissa asettuivat ajallisesti samalla tavalla arkipäiville, talvelle ja iltaan.

Jännitetasoja simuloitiin tarkasteltavan verkon 20/0,4 kV -muuntajien ensiöpuolen solmupisteissä. Näistä on vielä matkaa muuntajan läpi asiakkaan liityntäpisteelle, jossa jännitetaso on määritelty standardilla. Asiakkaalla tilanne voi olla huonompi tai vaihtoehtoisesti jännitettä voidaan korjata muuntajan käämikytkimen avulla, jos vaihtelu verkossa ei ole suurta. Tällä hetkellä simuloitavassa verkossa ei ollut hajautettua energiatuotantoa, mutta tulevaisuudessa voi olla. Tämä voi taas aiheuttaa ongelmia asiakkaan liityntäpisteessä, jos jännite on nostettu käämikytkimellä suuremmaksi. Kuitenkin alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa ongelmia ei ilmennyt, vaikka sielläkin käytiin välillä hieman suositeltua jännitettä matalammalla. Suomen vuoden 2030 tavoitteessa tilanne ei muutu ääriarvojen osalta. Jännitteet pysyivät edelleen hyvinä. EU:n vuoden 2030 tavoitteessa jännitetasot pysyivät edelleen melko samanlaisina kuin alkuperäisessä tilanteessa. Pienin jännite kuitenkin tippui 0,93 → 0,92 pu. Tässä tavoitteessa 5 % suosituksen alle menttiin jo hieman useamman tunnin kohdalla. EU:n vuoden 2050 tavoitteessa jännitteen pienin arvo oli tippunut arvoon 0,90 pu. Tämä on aivan standardin asettamalla rajalla. 5 % rajan yläpuolella pysyttiin hyvin vain kesäisin. Tämä on jo jännitteen kannalta ongelmallinen tilanne ja aiheuttaa asiakkaan liityntäpisteellä haasteita.

Harmonista kokonaissäröä simuloitiin tarkasteltavan verkon 20/0,4 kV muuntajien toisipuolella. Näissä simuloinneissa oli huomioitava, että lähtötilanteessa ei ollut tietoa

kuinka paljon harmonista kokonaissäröä jännitteeseen oli jo summautunut. Simuloinneissa käytettiin vain nollatasoa, jonka päälle särö summautui, kun simulointiin suuremmilla sähköajoneuvomäärillä. Todellisuudessa harmoninen kokonaissärö oli suurempi kuin mitä tuloksiksi saatiin. Alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa harmoninen kokonaissärö oli siis oletettu nollassa. Suomen vuoden 2030 tavoitteessa suurin särö oli noin 7,49 %, mikä on hyvin lähellä standardin asettamaa 8 % rajaa. Yleisesti särön huiput pysyttelivät kuitenkin 4–6 % tuntumassa. Tämä on jo hankala tilanne, kun tiedetään että todennäköisesti säröä oli oikeasti enemmän. EU:n vuoden 2030 tavoitteessa harmonisen kokonaissärön huippuarvo oli jo noin 8,54 ja se ylitti rajan useampaan kertaan vuoden aikana. Tämä ei kuitenkaan ollut vielä kovin yleistä. Tästä voi jo todeta, että tilanne on huono. EU:n vuoden 2050 tavoitteessa särön huippuarvo oli jo noin 9,70 ja se ylitti rajan useita kymmeniä kertoja vuoden aikana. Tässä kohdassa tilanne huononee entisestään. Australiassa tehdyssä tutkimuksessa on todettu, että paikallisen sähkönjakeluverkon harmoninen kokonaissärö on tyypillisesti noin 2–3 % (Nicholson et al. 2007). Tähän voidaan verrata nyt saatuja tuloksia.

Jännitteen epäsymmetriaa simuloitiin tarkasteltavan verkon 20/0,4 kV -muuntajien ensiöpuolen solmupisteissä. Tässäkään verkosta ei tiedetty epäsymmetrian arvoa lähtötilanteessa, vaan käytettiin sitä nollatasona. Alkuperäisessä vuoden 2017 tilanteessa jännitteen epäsymmetria oletettiin siis nollassa. Suomen vuoden 2030 tavoitteessa epäsymmetria ei vielä ylittänyt standardin rajoja ja sen huippuarvo oli maltillisesti noin 0,49 %. EU:n vuoden 2030 tavoitteessa epäsymmetrian huippuarvon kasvoi vähän ja oli noin 0,76 %. EU:n vuoden 2050 tavoitteessa epäsymmetrian huippuarvo oli taas noin 1,32 % ja pienin arvo noin 0,03 %. Verkossa oli jo koko ajan joissain solmupisteissä epäsymmetriaa ja maksimiarvokin oli kasvanut melko suureksi. Standardin arvoja ei kuitenkaan ylitetty. Tässä kohdassa oli kuitenkin huomioitava, että verkossa valmiiksi vaikuttavaa epäsymmetriaa ei tunnettu. Todellisuudessa vaiheet voivat olla huomattavasti enemmän epäsymmetrisesti kuormitettuja, kuin tämän työn simuloinneissa oli.

Mikäli sähköajoneuvot tulevat lisääntymään verkon alueella työssä kuvattujen tavoitteiden mukaan, on huomioitava asiat karkeasti seuraavassa järjestyksessä. Ensimmäisenä verkon sietokyvyn ongelmaksi todennäköisesti muodostuu 20/0,4 kV -muuntajien ylikuormitus. Tämä tulee tapahtumaan jossakin Suomen ja EU:n vuoden 2030 tavoitteiden kohdilla. Samaan aikaan ongelmia alkaa muodostua muuntajien toisiopuolella harmonisesta kokonaissäröstä. Se, kumpi tapahtuu ensin, on vaikea ennustaa tässä. Kuormituksella ja säröllä voi olla olemassa jokin suhde toisiinsa, mutta sitä ei tämän työn puitteissa ole ehditty selvittämään. Tämä ongelma aiheuttaa investointitarpeen tiettyjen muuntajien

kohdalla verkossa. Suurin osa nykyisistä muuntajista kuitenkin voi edelleen jatkaa käytössä ilman ongelmia. Harmonista kokonaissäröä voidaan yrittää eliminoida verkosta erilaisilla aktiivisilla ja passiivisilla suodattimilla tai muuntajien vaihdoilla. Tämäkin vaatii siis investointeja. Tilannetta olisi mahdollista korjata myös sähköajoneuvojen latauksen jaksoittamisella. Arkipäivinä illasta tulisi siirtää latauskuormaa yölle, jolloin muuntajien huipukuormat tasoittuisivat paremmin ja muuntajia ei välttämättä tarvitsisi vaihtaa tehokkaampiin.

Toisena ongelmana esiin nousee todennäköisesti verkon 20/0,4 kV -muuntajien ensiöpuolen solmupisteissä vaikuttava jännitetaso. Tämä tulee tapahtumaan jossain EU:n vuosien 2030 ja 2050 tavoitteiden kohdilla. Tätä ongelmaa voidaan yrittää korjata yksinkertaisimmillaan nostamalla toisiopuolen jännitettä muuntajassa väliottokytkintä tai käämikykintä säätämällä. Tämän vaihtoehdon kuitenkin saattaa tehdä huonoksi se, että jännitteen vaihtelu verkossa oli näissä tavoitteissa jo kohtuullisen suurta. Tällöin verkon suurin jännite voi nousta liian suureksi tietyissä solmupisteissä. Näiden käyttö on todennäköisesti edullisin ratkaisu, mutta väliottokytken käyttö vaatii muuntajan ottamisen jännitteettömäksi.

Kolmantena ja viimeisenä tuli vastaan jännitteen epäsymmetrian rajat. Työssä tutkituilla tavoitteilla rajat eivät kovin selkeästi tulleet vastaan, mutta tämäkin on otettava huomioon, koska verkon alkutilanteen epäsymmetriaa ei tiedetty. Epäsymmetrian aiheuttamat ongelmat tulevat todennäköisesti toteutumaan vasta EU:n vuoden 2050 tavoitteen kohdalla tai sen jälkeen. Tämän korjaamiseksi sähköajoneuvot pitäisi saada latautumaan tasaisesti kaikista kolmesta sähköverkon vaiheesta. Mikäli vaiheet kuormittuvat eri tavoin, syntyy verkkoon epäsymmetriaa. Sähköajoneuvoille ja sähköverkolle pitäisi rakentaa informaatioväylä keskinäiseen keskusteluun, jotta lataus suoritettaisiin oikeasta vaiheesta tai oikeista vaiheista, mikä tarkoittaa tietyn tyyppistä älykästä sähköverkkoa. Tämä olisi kuitenkin varsin suuri investointi verkkoon. Toinen yksinkertaisempi vaihtoehto olisi saada aikaan käytäntö, jossa latauspisteet asennettaisiin eri vaiheille verkossa siten, että vaiheiden tasainen kuormitus huomioitaisiin.

## LÄHTEET

The European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), (2018), Download Historical series 1995-2017: new passenger car registrations by segments & body, ACEA. Saatavissa (viitattu 5.10.2018):  
<https://www.acea.be/statistics/tag/category/segments-body-country>

Jukka Ahoranta, (2004), Sähkötekniikka, WSOY, s. 320–321.

Juhani Bastman, (2012), Luento 10 Symmetriset komponentit (TTY:n kurssin SVT-3400 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi opintomateriaali), s. 1–3, 12–13.

Juhani Bastman, (2014a), Luento 4 Tehonsäätö (TTY:n kurssin DEE-24010 opintomateriaali), Moodle/TTY, s. 3–6.

Juhani Bastman, (2014b), Luento 2 Rinnakkais- ja sarjakompensointi (TTY:n kurssin DEE-24010 opintomateriaali), Moodle/TTY, s. 2–9.

Biomeri Oy, (2009), Sähköajoneuvot Suomessa – selvitys, s. 11–13, 45–46.

Biontologist, (2016), Fastcharge station with 3 plugs, Netherlands, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 26.10.2017):  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fastchargepoint3plugs.jpg>

C-CarTom, (2011), DC quick charging plug at Vacaville, California (I-80 and Davis St) CHAdeMO / TEPCO station, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 26.10.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CHAdeMO\\_Plug\\_VacavilleDavisStDC2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CHAdeMO_Plug_VacavilleDavisStDC2.jpg)

CHAdeMO, (2019), High Power roadmap, CHAdeMO. Saatavissa (viitattu 9.4.2019):  
<https://www.chademo.com/technology/high-power/>

Conductix-Wampfler, (2012), First large electric public-service bus with wireless inductive charging technology tested in the Netherlands, Conductix-Wampfler. Saatavissa (viitattu 27.11.2017):  
<http://www.conductix.com/en/news/2012-10-01/first-large-electric-public-service-bus-wireless-inductive-charging-technology-tested-netherlands>

CT LAB, (2017), What is Voltage Unbalance? CT LAB. Saatavissa (viitattu 10.1.2018):  
<http://www.ctlab.com/casestudies/unbalance/>

darkweasel94, (2012), Präsentation der neuen E-Busse für Wien, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 23.11.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rampini\\_Ladevorgang.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rampini_Ladevorgang.JPG)

Dmitry G, (2014), How to wire European 3-phase plug, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 17.11.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:How\\_to\\_wire\\_3-phase\\_plug.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:How_to_wire_3-phase_plug.JPG)

Christophe Duponcheele, (2015), Plugs & charges Tesla Model S, Tesla Club Belgium. Saatavissa (viitattu 17.11.2017):  
<http://www.teslaclub.be/charging>

Electric Power Research Institute, (2017), Background, Electric Power Research Institute. Saatavissa (viitattu 19.1.2018):  
<https://sourceforge.net/projects/electricdss/files/>

Euroopan komissio, (2011), Valkoinen kirja, Yhtenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma – Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää, Euroopan komissio, s. 9–10.

European commission, (2016), Commission staff working document, The implementation of the 2011 White Paper on Transport "Roadmap to a Single European Transport Area – towards a competitive and resource-efficient transport system" five years after its publication: achievements and challenges, European commission, s. 18.

Taylor M. Fisher, Kathleen Blair Farley, Yabiao Gao, Hua Bai, Zion Tsz Ho Tse, (2014), Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems, Cambridge University Press, s. 87–89.

FleetCarma, (2017), When Can We Expect Wireless Charging for Electric Vehicles?, FleetCarma. Saatavissa (viitattu 27.11.2017):  
<https://www.fleetcarma.com/when-can-we-expect-wireless-charging-for-electric-vehicles/>

Hadhuey, (2015), Elektrauto Ladestation: Tesla-Supercharger-Stecker in Deutschland, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 31.10.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2015-12-30\\_Tesla-Supercharger-Stecker.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2015-12-30_Tesla-Supercharger-Stecker.jpg)

Michael Hicks, (2012), SAE J1772 plug, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 26.10.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SAE\\_J1772\\_7058855567.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SAE_J1772_7058855567.jpg)

International Electrotechnical Commission, (2017), IEC 61851-1 Ed. 3: Electric vehicle conductive charging system Part 1: General requirements, International Electrotechnical Commission, s. 18–19, 29–31

International Energy Agency (IEA), (2017), Energy Technology Perspectives 2017, IEA, s. 86.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), (2012), IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE, s. 11–12.

JET Charge, (2019), Plug Types, JET Charge. Saatavissa (viitattu 9.4.2019):  
<https://jetcharge.com.au/resources/ev-guide/vehicle-plug-types>

Juice Technology AG, (2017), JUICE BOOSTER 2, Juice Technology AG. Saatavissa (viitattu 17.11.2017):  
<http://www.juice-technology.com/en/produkte/juice-booster-2>

Ville Karttunen, Anna Kumpulainen, Aki Pesola, Juha Vanhanen, (2015), Sähköisen liikenteen dynaamiset vaikutukset, Gaia, s. 4.

Kari Kortelainen, (2017), Vetyauto karkkyy jo vuoroaan: yli 500 km tankillisella ja päästöt vain vettä, Tekniikka&Talous. Saatavissa (viitattu 25.4.2019):  
<https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/autot/vetyauto-karkkyy-jo-vuoroaan-yli-500-km-tankillisella-ja-paastot-vain-vetta-6635823>

Erkki Lakervi, Jarmo Partanen, (2008), Sähkönjakelutekniikka, Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto, s. 74–76.

Liikennejärjestelmä.fi -portaali, (2019), Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt, Liikenne- ja viestintäministeriö, Liikenne- ja viestintävirasto, Väylävirasto, Ilmatieteen laitos. Saatavissa (viitattu 19.4.2019):  
<http://liikennejarjestelma.fi/ymparisto/paastot-ilmaan/liikenteen-kasvihuonekaasupaastot/>

Vesa Linja-aho, (2016), Sähköautoon kotipistorasiasta jatkossa vain 8 ampeerin virtaa, Elektroniikkalehti. Saatavissa (viitattu 1.11.2017):  
<http://etn.fi/index.php/13-news/5562-sahkoautoon-kotipistorasiasta-jatkossa-vain-8-ampeerin-virtaa>

Mika Lötjönen, (2015), Sähköajoneuvojen latauksen ohjaus sähkövoimajärjestelmän vakautusreservinä, Tampereen Teknillinen Yliopisto, s. 4–5.

C. A. G. Medeiros, PhD, F. N. Belchior, MSc and J. C. de Oliveira, PhD, (2004), A Proposal for UIE/IEC Flicker Measurement Using Digital Filters: Equipment Prototype and Validation, IEEE, s. 549–550.

Antti Mäkinen, (2017), Sähköverkon häiriöt ja sähkönlaatu (TTY:n kurssin DEE-24020 opintomateriaali), POP/TTY s. 13-19. (viitattu 22.12.2017):  
<https://portal.tut.fi/group/pop/opas/toteutuskerrat/-/toteutuskerta/2017-2018/70724>

Glenn Nicholson, V.J. Gosbell, Member, IEEE, and Ashok Parsotam, (2007), Analysis of Harmonic Distortion Levels on a Distribution Network, IEEE, s. 1–3, 6.

Michael Nikowitz, (2016), Advanced Hybrid and Electric Vehicles, Springer, s. 3–14, 27–38.

Nissan, (2018), e-NV200, Nissan. Saatavissa (viitattu 5.3.2018):  
<https://www.nissan.fi/ajoneuvot/henkiloautot/e-nv200.html>

Kirsi Nousiainen, (2011), Luento 12 Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä (TTY:n kurssin SVT-Sähkövoimajärjestelmän perusteet), s. 2.

NRGkick, (2017), Features, NRGkick. Saatavissa (viitattu 17.11.2017):  
<https://www.nrgkick.com/>

Simona Onori, Lorenzo Serrao, Giorgio Rizzoni, (2016), Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies, Springer, s. 1–4.

Opel, (2018), SÄHKÖMOOTTORIJÄRJESTELMÄN UUSI MÄÄRITELMÄ, Opel. Saatavissa (viitattu 5.3.2018):  
<http://www.opel.fi/vehicles/opel-valikoima/autot/ampera/features/technology.html>

Plugit Finland Oy, (2017), Latauspistoketyypit sähköautoille, Plugit Finland Oy. Saatavissa (viitattu 4.10.2017):

<https://plugit.fi/fi-fi/article/etusivu/latauspistoketyypit-sahkoautoille/135/#>

Qualcomm, (2017), Wireless Electric Vehicle Charging, Qualcomm. Saatavissa (viitattu 27.11.2017):

<https://www.qualcomm.com/solutions/automotive/wevc>

A. Rautiainen, S. Repo, P. Järventausta, A. Mutanen, K. Vuorilehto, K. Jalkanen, (2012) Statistical charging load modeling of PHEVs in electricity distribution networks using national travel survey data, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, Dec. 2012, s. 1650–1659.

Jukka Ristikartano, Pekka Iikkanen, Juha Tervonen, Tuomo Lapp, (2014), Valtakunnallinen tieliikenne-ennuste 2030, Liikennevirasto, s. 38.

Schneider Electric, (2017a), Mode 1 Recharge EV, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 29.9.2017):

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mode1.JPG>

Schneider Electric, (2017b), Mode 2 EV, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 29.9.2017):

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mode2.JPG>

Schneider Electric, (2017c), Mode 3 EV, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 29.9.2017):

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mode3.JPG>

Schneider Electric, (2017d), Mode 4 EV, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 29.9.2017):

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mode4.JPG>

SESKO, (2017a), Sähköajoneuvojen lataaminen kiinteistöjen sähköverkoissa, SESKO. Saatavissa (viitattu 29.9.2017):

[http://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin\\_aihealueita/sahkoautot\\_ja\\_latausjarjestelmat/lataussuositus\\_2014](http://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/lataussuositus_2014)

SESKO, (2017b), Sähköautot ja latausjärjestelmät, SESKO. Saatavissa (viitattu 6.10.2017):

[https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin\\_aihealueita/sahkoautot\\_ja\\_latausjarjestelmat](https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat)

SESKO, (2019a), Sähköajoneuvojen lataussuositus, SESKO, s.1. Saatavissa (viitattu 9.4.2019):

[https://www.sesko.fi/files/889/Lataussuositus\\_2018\\_2018-03-08.pdf](https://www.sesko.fi/files/889/Lataussuositus_2018_2018-03-08.pdf)

SESKO, (2019b), Sähköajoneuvojen johdoton lataus, SESKO, Saatavissa (viitattu 16.4.2019):

[https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin\\_aihealueita/sahkoautot\\_ja\\_latausjarjestelmat/lataussuositus](https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/lataussuositus)

Siemens, (2017a), All Electric System, Siemens. Saatavissa (viitattu 11.7.2017):

<http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/automotive/pages/all-electric-system.aspx>

Siemens, (2017b), Charge your future – with the Siemens eBus charging infrastructure, Siemens. Saatavissa (viitattu 23.11.2017):  
<https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/road-solutions/electromobility/ebus-charging.html>

Paul Sladen, (2017), Comparison between Type 2 and Type 2 Combo automotive charging connectors, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 26.10.2017):  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:lec-type2-ccs-combo2-and-iec-type2-charging-connectors-side-by-side.jpg>

SolvingEV, (2017), CHAdeMO - Electric Vehicle Chargers, SolvingEV. Saatavissa (viitattu 26.10.2017):  
<http://solvingev.com/charger-type/chademo>

SomnusDe, (2010), CEE 7/7 plug, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 1.11.2017):  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CEE-7-7-Stecker\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CEE-7-7-Stecker_2.jpg)

Antti Supponen, Antti Rautiainen, Joni Markkula, Antti Mäkinen, Pertti Järventausta, Sami Repo (2016), Power quality in distribution networks with electric vehicle charging – a research methodology based on field tests and real data, Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).

Seppo Suurinkeroinen, (2012), Välykyntä ja sen aiheuttajia sähköverkossa, Kymenlaakson Sähköverkko Oy, s. 7–13.

Natthanan Tangsunantham and Chaiyod Pirak, (2013), Voltage Unbalance Measurement in Three-Phase Smart Meter Applied to AMI systems, IEEE, s. 1–2.

Tesla, (2018), Model S, Tesla. Saatavissa (viitattu 5.3.2018):  
[https://www.tesla.com/fi\\_FI/models](https://www.tesla.com/fi_FI/models)

Tesla, (2019), Introducing V3 Supercharging, Tesla. Saatavissa (viitattu 4.4.2019):  
[https://www.tesla.com/fi\\_FI/blog/introducing-v3-supercharging?redirect=no](https://www.tesla.com/fi_FI/blog/introducing-v3-supercharging?redirect=no)

Toyota, (2017), Technology File - Hybrid Systems, Toyota. Saatavissa (viitattu 15.3.2017):  
[http://www.toyota.com.cn/innovation/environmental\\_technology/technology\\_file/](http://www.toyota.com.cn/innovation/environmental_technology/technology_file/)

Trafi, (2017a), Liikennekäytössä olevat sähköautot, Trafi. Saatavissa (viitattu 8.2.2018):  
[https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan\\_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset\\_autot](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot)

Trafi, (2017b), Liikenteessä olevat ajoneuvot 2017, Trafi, Saatavissa (viitattu 16.2.2018):  
[https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokantatilastot\\_ajoneuvolajeittain/liikennekaytossa\\_olevat\\_ajoneuvot\\_2017](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokantatilastot_ajoneuvolajeittain/liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot_2017)

Työ- ja elinkeinoministeriö, (2017), Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriö, s. 58–59.

Juha Vesa, (2019), Sähköajoneuvojen latausjärjestelmien standardointi, SESKO, s. 15, 19. Saatavissa (viitattu 9.4.2019):  
[https://www.sesko.fi/files/846/Sahkoajoneuvojen\\_latausjarjestelmien\\_standar-dointi\\_yleinen.pdf](https://www.sesko.fi/files/846/Sahkoajoneuvojen_latausjarjestelmien_standar-dointi_yleinen.pdf)

Virta, (2018), Sähköautojen ja polttomoottoriautojen hinnat tasoihin noin vuonna 2025, Virta, Saatavissa (viitattu 27.4.2019):  
<https://www.virta.global/news-fi/s%C3%A4hk%C3%B6autojen-ja-polttomoottoriautojen-hinnat-tasoihin-jo-vuonna-2025>

Ywchow, (2010), Shuttle Bus inside Shanghai Expo 2010, Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 23.11.2017):  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:ShanghaiExpo2010\\_Shuttle\\_Bus.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:ShanghaiExpo2010_Shuttle_Bus.jpg)

Zap-Map, (2017), Charging speeds & connectors, Zap-Map. Saatavissa (viitattu 31.10.2017):  
<https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/>

# LIITE A: LATAUSTEHOJEN JAKAUTUMINEN ASIAKASTYYPEILLE

Liittymän tiedot	Latausteho		
	1 x 10 A	1 x 20 A	3 x 32 A
Tievalot			
Omakotitalo, suora sähkölämmitys, lämminvesivaraaja < 300 l	x	x	
Omakotitalo, suora sähkölämmitys, lämminvesivaraaja > 300 l	x	x	x
Omakotitalo, suora sähkölämmitys, lattialämmitys > 2 kW	x	x	
Omakotitalo, osittain varaava sähkölämmitys, lyhyt sulku aika	x		
Omakotitalo, osittain varaava sähkölämmitys, pitkä sulku aika	x		
Omakotitalo, varaava sähkölämmitys	x		
Omakotitalo, lämpöpumppulämmitys	x		
Omakotitalo, kaksoislämmitys 1-aikatariffi	x		
Omakotitalo, kaksoislämmitys 2-aikatariffi	x		
Omakotitalo, kaksoislämmitys kauitariffi	x		
Omakotitalo, ei sähkölämmitystä, ei sähkökiuas	x		
Omakotitalo, ei sähkölämmitystä, sähkökiuas	x	x	
Rivi-/Kerrostaloasunto, ei sähkölämmitystä, ei sähkökiuas	x		
Rivi-/Kerrostaloasunto, ei sähkölämmitystä, sähkökiuas	x	x	
Kerrostalo, ei asuntojen osuutta			
Kerrostalo, asunnot mukana			
Rivitalo, koko kiinteistö, suora sähkölämmitys	x	x	x
Loma-asuntoalue, koko muuntopiiri	x		
Maatalous, karja/maito, ei asumista			
Maatalous, karja/maito, asuminen	x		
Maatalous, karja/maito, asuminen + sähkökiuas	x		
Maatalous, karja/maito, asuminen + sähkökiuas, sähkölämmitys	x	x	
Maatalous, liha, ei asumista			
Maatalous, liha, asuminen	x		
Maatalous, viljely, ei asumista			
Maatalous, viljely, asuminen	x		
Maatalous, karja/maito, yhdistetty			
Maatalous, sikala, asuminen + sähkökiuas, sähkölämmitys	x		
Maatalous, kanala, yhdistetty			
Teollisuus, tekstiilien , vaatteiden ja nahkatuotteiden valmistus, 1-vuoro			
Teollisuus, puutavaran valmistus, 1-vuoro			
Teollisuus, paperiteollisuustuotteiden valmistus, graafinen tuotanto, 1-vuoro			
Teollisuus, kemiallisten , öljy- kumi- ja muovituotteiden valmistus, 1-vuoro			
Teollisuus, metalli- ja konepajatuotteiden valmistus, 1-vuoro			
Teollisuus, elintarvikkeet, juomat, tupakka, valmistus, 2-vuoro			
Teollisuus, tekstiilien , vaatteiden ja nahkatuotteiden valmistus, 2-vuoro			
Teollisuus, kemiallisten , öljy- kumi- ja muovituotteiden valmistus, 2-vuoro			
Teollisuus, metalli- ja konepajatuotteiden valmistus, 2-vuoro			
Yhdyskuntahuolto, vesihuolto			
Yleis- ja muu hallinto			
Opetus- ja koulutustoimi			
Julkinen palvelu, suuret oppilaitokset			
Sairaalat ja terveydenhoito			
Tukkukauppa			
Tavaratalo / marketti			
Muu vähittäiskauppa			
Automyynti ja huoltamatoiminta			
Automyynti			
Hotelli ja majoitus			
Ravintola / Kahvila			
Rahalaitos / Vakuutustoiminta			
Virkistys ja kulttuuripalvelutoiminta			

## LIITE B: TILASTOT LATAUSAJOISTA JA ENERGIOISTA

1 x 10 A - 2,3 kW		Kesäajan energiat [kWh]				
Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,34	0,80	0,30	0,77	0,36	0,83
2	0,27	0,73	0,25	0,71	0,32	0,77
3	0,23	0,67	0,22	0,67	0,26	0,72
4	0,19	0,62	0,21	0,67	0,23	0,69
5	0,09	0,44	0,12	0,51	0,11	0,50
6	0,07	0,39	0,11	0,48	0,11	0,49
7	0,05	0,33	0,09	0,43	0,09	0,42
8	0,04	0,29	0,08	0,43	0,07	0,36
9	0,04	0,30	0,07	0,36	0,06	0,35
10	0,04	0,28	0,06	0,34	0,07	0,36
11	0,07	0,35	0,09	0,39	0,07	0,34
12	0,09	0,39	0,24	0,65	0,06	0,32
13	0,15	0,50	0,34	0,74	0,07	0,36
14	0,20	0,58	0,35	0,73	0,18	0,52
15	0,24	0,64	0,40	0,79	0,29	0,73
16	0,32	0,71	0,33	0,72	0,30	0,73
17	0,48	0,82	0,35	0,79	0,42	0,82
18	0,57	0,91	0,39	0,83	0,50	0,89
19	0,58	0,92	0,41	0,84	0,54	0,92
20	0,54	0,92	0,41	0,85	0,57	0,95
21	0,53	0,92	0,39	0,81	0,60	0,98
22	0,51	0,91	0,38	0,81	0,64	1,02
23	0,46	0,88	0,35	0,80	0,59	0,97
24	0,37	0,83	0,34	0,81	0,53	0,95

1 x 10 A - 2,3 kW		Talviajan energiat [kWh]				
Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,37	0,83	0,49	0,93	0,44	0,88
2	0,30	0,76	0,43	0,89	0,38	0,84
3	0,24	0,69	0,38	0,83	0,32	0,78
4	0,19	0,63	0,32	0,79	0,26	0,72
5	0,08	0,42	0,14	0,54	0,13	0,52
6	0,07	0,37	0,11	0,48	0,10	0,46
7	0,05	0,33	0,09	0,43	0,07	0,37
8	0,04	0,29	0,07	0,39	0,05	0,31
9	0,04	0,26	0,05	0,31	0,05	0,31
10	0,04	0,25	0,04	0,27	0,03	0,24
11	0,06	0,31	0,05	0,32	0,04	0,28
12	0,08	0,37	0,06	0,30	0,03	0,25
13	0,15	0,50	0,11	0,43	0,06	0,34
14	0,20	0,58	0,29	0,70	0,12	0,45
15	0,24	0,63	0,39	0,80	0,15	0,52
16	0,37	0,75	0,45	0,82	0,17	0,57
17	0,55	0,88	0,56	0,91	0,20	0,60
18	0,67	0,95	0,62	0,96	0,53	0,92
19	0,66	0,97	0,66	0,98	0,56	0,94
20	0,65	0,97	0,71	1,01	0,63	0,96
21	0,62	0,96	0,71	1,04	0,72	1,01
22	0,58	0,95	0,65	1,00	0,68	1,02
23	0,52	0,94	0,58	0,99	0,64	1,00
24	0,44	0,88	0,49	0,92	0,56	0,98

**1 x 20 A - 4,6 kW Kesäajan energiat [kWh]**

Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,24	0,98	0,30	1,10	0,29	1,04
2	0,15	0,78	0,22	0,94	0,22	0,94
3	0,09	0,61	0,08	0,57	0,18	0,89
4	0,05	0,46	0,06	0,53	0,13	0,71
5	0,02	0,29	0,04	0,38	0,04	0,44
6	0,01	0,24	0,06	0,53	0,02	0,30
7	0,02	0,23	0,04	0,28	0,02	0,19
8	0,03	0,30	0,03	0,38	0,03	0,28
9	0,04	0,34	0,06	0,50	0,03	0,16
10	0,06	0,39	0,07	0,37	0,04	0,32
11	0,14	0,65	0,19	0,77	0,12	0,64
12	0,17	0,70	0,32	1,01	0,09	0,47
13	0,23	0,82	0,33	0,93	0,16	0,76
14	0,25	0,88	0,50	1,25	0,30	0,88
15	0,31	0,96	0,53	1,24	0,46	1,28
16	0,41	1,08	0,42	1,17	0,41	1,16
17	0,67	1,39	0,47	1,28	0,57	1,36
18	0,80	1,54	0,49	1,33	0,74	1,55
19	0,76	1,54	0,46	1,25	0,82	1,63
20	0,64	1,45	0,43	1,25	0,77	1,60
21	0,59	1,40	0,42	1,23	0,66	1,50
22	0,51	1,34	0,50	1,35	0,61	1,51
23	0,41	1,25	0,49	1,37	0,57	1,43
24	0,32	1,14	0,42	1,22	0,46	1,33

**1 x 20 A - 4,6 kW Talviajan energiat [kWh]**

Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,22	0,92	0,30	1,06	0,27	1,02
2	0,13	0,71	0,15	0,77	0,16	0,83
3	0,07	0,52	0,11	0,66	0,10	0,61
4	0,03	0,36	0,06	0,51	0,05	0,46
5	0,02	0,24	0,03	0,34	0,03	0,33
6	0,01	0,17	0,02	0,30	0,02	0,28
7	0,02	0,27	0,03	0,35	0,01	0,22
8	0,03	0,28	0,03	0,31	0,01	0,20
9	0,04	0,31	0,01	0,12	0,03	0,31
10	0,06	0,40	0,05	0,32	0,02	0,28
11	0,10	0,54	0,11	0,60	0,04	0,39
12	0,16	0,69	0,14	0,63	0,06	0,48
13	0,23	0,82	0,32	0,98	0,20	0,77
14	0,25	0,89	0,44	1,17	0,35	1,04
15	0,34	1,01	0,52	1,31	0,49	1,27
16	0,52	1,22	0,61	1,37	0,54	1,35
17	0,79	1,49	0,85	1,62	0,66	1,41
18	0,94	1,63	0,87	1,63	0,78	1,60
19	0,87	1,63	0,89	1,67	0,78	1,61
20	0,77	1,56	0,96	1,74	0,82	1,59
21	0,69	1,50	0,78	1,64	0,90	1,69
22	0,62	1,45	0,64	1,47	0,78	1,64
23	0,49	1,34	0,48	1,36	0,65	1,55
24	0,33	1,11	0,35	1,16	0,53	1,42

**3 x 32 A - 22 kW Kesäajan energiat [kWh]**

Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,03	0,72	0,00	0,00	0,17	1,34
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1,06
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,03	0,49	0,05	0,60	0,00	0,00
8	0,04	0,44	0,05	0,58	0,03	0,34
9	0,04	0,40	0,05	0,48	0,03	0,23
10	0,10	0,71	0,07	0,44	0,07	0,70
11	0,21	1,27	0,40	1,61	0,22	1,84
12	0,17	0,86	0,30	1,37	0,14	0,82
13	0,34	1,74	0,56	2,48	0,26	1,85
14	0,29	1,55	1,03	3,39	0,68	2,51
15	0,44	1,93	0,40	1,84	0,59	2,67
16	0,63	2,32	0,58	2,67	0,39	1,89
17	1,15	3,33	0,33	1,34	0,91	3,27
18	1,06	3,37	0,56	2,79	1,01	3,40
19	0,70	2,68	0,71	3,04	0,80	2,87
20	0,49	2,24	0,38	2,48	0,64	2,61
21	0,50	2,37	0,38	1,87	0,80	3,28
22	0,33	1,80	0,51	2,68	0,43	2,41
23	0,30	2,03	0,36	2,02	0,39	2,07
24	0,08	0,82	0,11	1,20	0,31	2,50

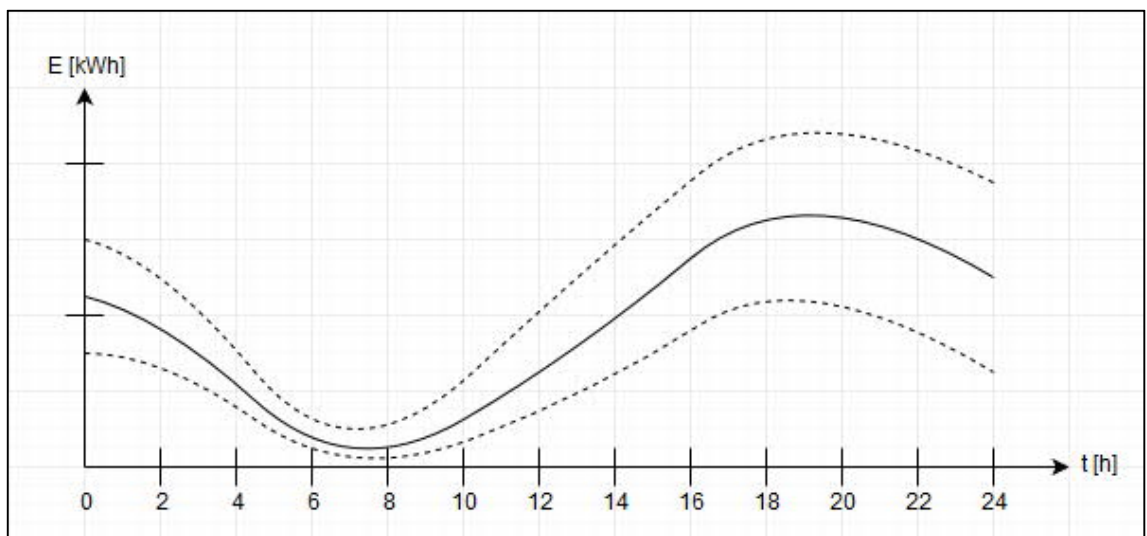
**3 x 32 A - 22 kW Talviajan energiat [kWh]**

Vuorokauden tunnit	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta	Odotusarvo	Keskihajonta
	Arkipäivät	Arkipäivät	Lauantait	Lauantait	Sunnuntait	Sunnuntait
1	0,04	0,62	0,05	0,76	0,12	1,09
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,32
3	0,00	0,00	0,02	0,41	0,01	0,09
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11
5	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,93
6	0,01	0,47	0,00	0,00	0,01	0,17
7	0,04	0,53	0,01	0,16	0,00	0,00
8	0,01	0,20	0,02	0,24	0,00	0,00
9	0,05	0,54	0,00	0,00	0,08	0,80
10	0,08	0,75	0,13	0,80	0,01	0,06
11	0,13	0,92	0,14	1,18	0,18	1,65
12	0,26	1,51	0,28	1,71	0,07	0,57
13	0,30	1,53	0,56	2,35	0,37	1,90
14	0,34	1,61	0,53	2,00	0,62	2,63
15	0,50	2,02	0,78	3,05	0,94	3,30
16	0,85	2,72	1,05	3,32	0,78	3,11
17	1,28	3,56	1,05	3,00	0,80	2,76
18	1,34	3,74	1,14	3,93	1,00	3,44
19	0,81	2,97	0,96	3,14	0,73	2,75
20	0,57	2,46	0,83	3,11	0,78	2,92
21	0,47	2,07	0,56	2,66	1,23	3,94
22	0,40	2,03	0,25	1,57	0,56	2,91
23	0,18	1,48	0,19	1,76	0,32	1,94
24	0,11	1,16	0,10	0,91	0,10	1,40

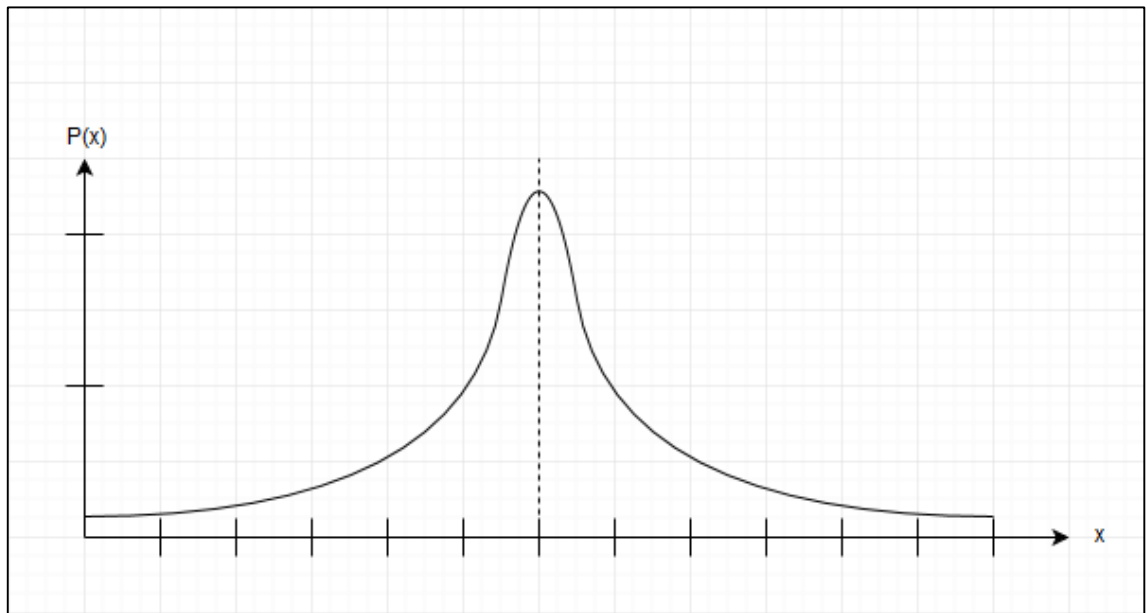
## LIITE C: LATAUKSEN SATUNNAISTAMINEN

Tässä liitteessä on selvitetty, kuinka simuloinneissa käytetyt latausajat ja energiat ovat satunnaistettu. Satunnaistaminen on tehty arkipäiville, lauantapäiville ja sunnuntaipäiville erikseen. Samoin kesä ja talviajoille erikseen. Erilaisia tuloksia yhdelle tulevaisuuden tavoitteelle satunnaistamisen jälkeen on siis yhteensä kuusi. Kuvat liitteessä ovat havainnollistavia esimerkkikuvia, eivätkä liity suoraan mihinkään tiettyyn päivään tai vuodenaikaan.

Lähtötiedoista saatiin kuvaajia, joista selviää latausenergioiden odotusarvot ja keskihajonnat kaikille vuorokauden tunneille. Yksi tällainen kuvaaja on esitetty alla.

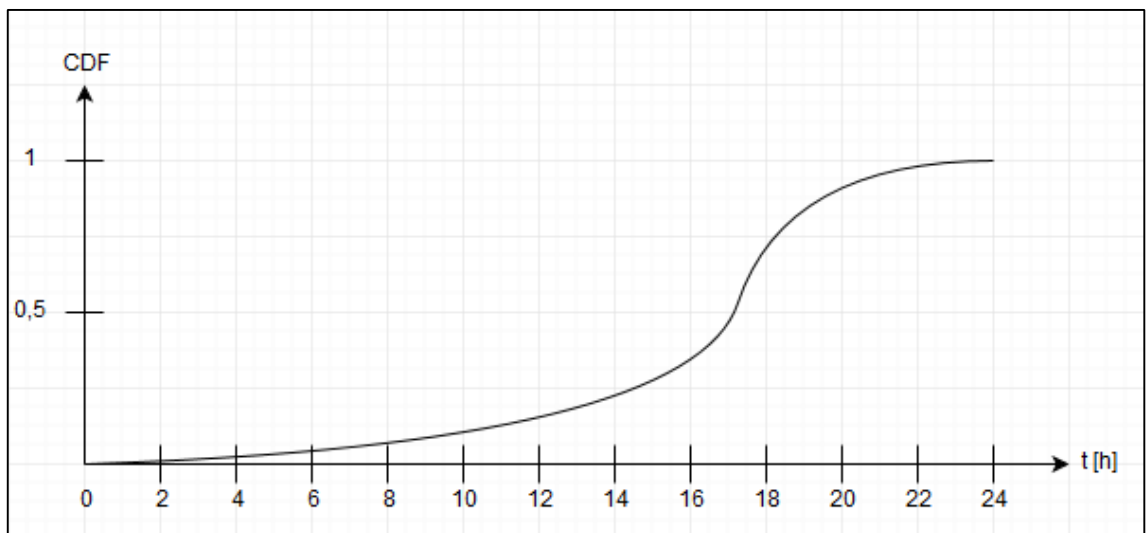


Näistä vuorokauden tunneista muodostettiin tiheysfunktio yhden vuorokauden latausenergialle. Tästä saatiin selvitettyä todennäköisyys, mikä on latausenergia yhden tunnin aikana. Tiheysfunktion kuvaaja on esitetty alla.



Tiheysfunktioita käytettiin latausenergian satunnaistamiseen. Tästä selvitettiin kuinka paljon tietty yksittäinen sähköauto käyttää latausenergiaa.

Lopuksi lähtötiedoista laadittiin vielä kertymäfunktio. Tästä saatiin todennäköisyydet latauksen aloitustunnille. Tämä on esitetty alla.



Kertymäfunktioita käytettiin latausajan aloittamisajankohdan satunnaistamiseen, siten että saatiin tehtyä yksi lataus vuorokauden aikana. Näin saatiin satunnaistettua latauksen aloitusajankohta, mutta samalla painotettua se todennäköisyyksien mukaan.